CLÁUDIO HOMERO FERREIRA DA SILVA

CONTROLE DE PROCESSOS APLICADO A SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO E CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

LAVRAS – MG

2010

CLÁUDIO HOMERO FERREIRA DA SILVA

CONTROLE DE PROCESSOS APLICADO A SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO E CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Formas Alternativas de Energia, para a obtenção do título de especialista.

Orientador:
D. Sc. Egberto Gomes Franco

LAVRAS - MG
2010

CLÁUDIO HOMERO FERREIRA DA SILVA

CONTROLE DE PROCESSOS APLICADO A SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO E CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Formas Alternativas de Energia, para a obtenção do título de especialista.

APROVADA em 12 de Agosto de 2010

D. Sc. Vitor Hugo Teixeira UFLA

D. Sc. Luciano Mendes dos Santos UFLA

D.Sc. Gilmar Tavares UFLA

D. Sc. Egberto Gomes Franco
Orientador

LAVRAS - MG
2010

À minha amada Maria Teresinha e à minha família: Homero, Iolanda e Cristiano, que acreditaram em meu potencial e sempre me incentivaram...

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

As células a combustível são equipamentos de conversão eletroquímica de energia e usam basicamente gases ricos ou puros em hidrogênio para gerar calor e energia elétrica. Apesar dos princípios de funcionamento terem sido descobertos há mais de um século, ainda existem diversos gargalos tecnológicos que distanciam as células a combustível da realidade comercial. Esses equipamentos encontram-se no centro da economia do hidrogênio, onde todas as fontes de energia seriam direcionadas para a produção deste gás e uso nestes equipamentos. Tal realidade possui diversos benefícios, principalmente no quesito ambiental e na flexibilidade de fonte energética. Tanto a tecnologia de produção de hidrogênio, como por exemplo, em reformadores, quanto o uso nas células a combustível requerem sistemas de controle eficientes para lidar com a complexidade das transformações da energia química para a energia elétrica. Neste contexto, os controladores preditivos têm se mostrado de grande aplicabilidade e desempenho em controle de processos industriais. Este trabalho trata da aplicação da técnica de controle preditivo ao modelo de um reformador e ao modelo de uma célula a combustível. Os resultados mostram o desempenho do controle, apresentando respostas adequadas e compatíveis. A atuação deste sistema de controle pode contribuir para a confiabilidade e desempenho dos sistemas de produção de hidrogênio e células a combustível, tornando a realidade comercial destes equipamentos mais próxima da atual sociedade.

Palavras-chave: Célula a combustível. Controle preditivo. Hidrogênio. Reforma.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Curva elasticidade x renda.....12
Figura 2 Previsão de aumento de consumo de energia no Brasil.....16
Figura 3 Produção e uso de hidrogênio como vetor energético.....18
Figura 4 Estrutura de uma célula a combustível do tipo PEMFC.....23
Figura 5 Estado da arte para CaCs para aplicações estacionárias.....27
Figura 6 Horizonte de ações, centro da teoria de MPC 32
Figura 7 Controle clássico x controle preditivo.....32
Figura 8 Diagrama de blocos da planta e do sistema de controle.....35
Figura 9 Principais componentes do FPS. 48
Figura 10 Modelo dinâmico do FPS 50
Figura 11 Malha aberta do sistema FC 52
Figura 12 Resposta do sistema em malha fechada.....53
Figura 13 Resposta do sistema em malha aberta 55
Figura 14 Resposta do sistema em malha fechada.....56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Impacto dos principais constituintes dos combustíveis nas CaCs. 20
Tabela 2 Comparação entre CaCs e outras formas de geração distribuída.....22
Tabela 3 Custos gás natural e energia elétrica. 26
Tabela 4 Investimento em células combustíveis.....27
Tabela 5 Classificação de estratégias de controle segundo seu uso na indústria.30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo	11
1.2	Resumo do trabalho	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Definição: células a combustível	18
2.2	Principais características	19
2.3	Tipos de células a combustível	20
2.4	PEMFC	22
2.5	Células a combustível: desafios tecnológicos	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS: O CONTROLE PREDITIVO	28
3.1	Controle preditivo baseado em modelo (MPC)	30
3.1.1	MPC com horizonte infinito	33
3.2	MPC Com restrições implementado	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS: MODELAGEM DINÂMICA	44
4.1	Controle aplicado a células do tipo PEMFC	46
4.2	Sistema de processamento de combustível	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1	Controle aplicado a células do Tipo PEMFC	51
5.2	Sistema de processamento de combustível	54
5.3	Discussão	57
6	CONCLUSÃO	58
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	58
	REFERÊNCIAS	59
	ANEXO A – DECLARAÇÃO DE AUTORIA	63
	ANEXO B – REVISÃO DE TEXTO	64

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade moderna encontra-se profundamente associado com o uso da energia. Contudo o modelo energético baseado no uso de combustíveis fósseis possui uma natureza efêmera, uma vez que os recursos naturais são finitos. Esse fato acarreta a necessidade do desenvolvimento de tecnologias que façam o uso de fontes renováveis de energia.

Alguns pesquisadores defendem a descarbonização da fonte energética (RIFKI, 2001) e convergem para o desenvolvimento de uma economia baseada no uso do hidrogênio. O hidrogênio nesse caso não é uma fonte, mas sim um vetor, ou seja, um transportador energético. Apesar da concepção do uso do hidrogênio não ser recente, a concretização da chamada "economia do hidrogênio" ainda é, até certo ponto, um exercício para a prospecção futura, com perspectivas de aplicação concreta e em larga escala num horizonte de 40 à 60 anos, conforme indicam os cenários propostos por Grundy (2008).

O equipamento que faz o uso do hidrogênio para a produção de energia elétrica é a célula a combustível. Ela converte diretamente a energia química do combustível em energia elétrica através de reações de oxidação e redução, em um processo eletroquímico, ou seja, sem passar pela combustão, não tendo assim a sua eficiência limitada pelo ciclo termodinâmico (TOLMASQUIM, 2003).

No Brasil, os estudos se concentram principalmente no desenvolvimento de catalisadores. Existe uma carência quanto aos projetos de engenharia associados aos equipamentos auxiliares, tais como: sistemas diversos de controle da unidade de potência, equipamentos para condicionamento da energia elétrica produzida, sistema de umidificação dos gases. Existe ainda uma carência nacional no desenvolvimento de modelos e no estudo de simulações, análises, otimização e controle de processos aplicados a estes sistemas.

O controle preditivo baseado em modelos (MPC) tem se tornado uma importante estratégia de controle para aplicações industriais (SILVA, 2002). Muitos resultados de sucesso foram relatados e este fato confere a esta tecnologia uma grande aceitação. Este controle é caracterizado pela utilização explícita de um modelo, a fim de prever as saídas do processo em um tempo no futuro, pelo cálculo de uma seqüência de ações de controle que minimizem uma função objetivo com a aplicação da primeira ação de controle da seqüência calculada, atualização da medição e com novos cálculos de minimização. Os diversos algoritmos de controle preditivo diferem pela forma do modelo usado para representar o processo e o ruído e, pela função custo a ser minimizada. Muitas aplicações de controle preditivo com sucesso são relatadas, não só na indústria química como em outras áreas (SILVA 2009)

As tecnologias associadas com a produção e o uso de hidrogênio possuem atualmente várias barreiras de ordem tecnológica, que ainda restringem a sua aplicação e popularização. Pode-se citar: o balanço energético, a dificuldade de armazenamento e o custo dos sistemas de produção: das células a combustível e da energia gerada por essa rota tecnológica. Em certos casos, aguarda-se o desenvolvimento de materiais atualmente inexistentes que possam agregar características adequadas e que tragam algum benefício na superação de barreiras tecnológicas e mercadológicas.

A área de modelagem, simulação, controle, otimização e automação de processos possui um papel de vital importância e de relevante contribuição para: a melhoria no desempenho dos sistemas, fornecendo um referencial teórico através da modelagem; auxiliando na detecção de falhas e problemas; possibilitando um melhor comportamento e ainda preservando o sistema. Todos esses itens influenciam de alguma forma na vida útil, na confiabilidade e por conseqüência nos custos do sistema com células a combustível.

1.1 Objetivo

Este trabalho trata da engenharia de controle aplicada ao processo de produção e uso de hidrogênio para a geração de energia. Seu objetivo principal é executar a simulação dinâmica de modelos de processo associados com a produção de hidrogênio e a geração de energia em células a combustível realizando um estudo de análise dinâmica e de aplicação de controle preditivo baseado em modelos.

1.2 Resumo do trabalho

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias do hidrogênio com o enfoque de desenvolvimento sustentável. O Capítulo 3 desenvolve a formulação para controle MPC a ser aplicada aos modelos dinâmicos. O Capítulo 4 apresenta os modelos para sistemas de produção de hidrogênio (Reformador) e célula a combustível do tipo PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) a serem simulados. No Capítulo 5 são mostradas as simulações, juntamente com a discussão acerca do assunto. O Capítulo 6 indica as conclusões deste trabalho juntamente com as sugestões para pesquisa futura. Finalizando o trabalho encontram-se as referências utilizadas e os anexos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A energia é um dos pilares da sociedade moderna. A sua disponibilidade implica em acesso a serviços, informações e conforto. A curva elasticidade x renda, apresentada na Figura 1 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2006), relaciona a renda per capita com o gasto energético per capita. É possível ver claramente que quanto maior é o gasto energético maior é a renda da população. Ou seja, no modelo atual o objetivo de todos os países em crescer e se desenvolver terá reflexos substanciais na renda.

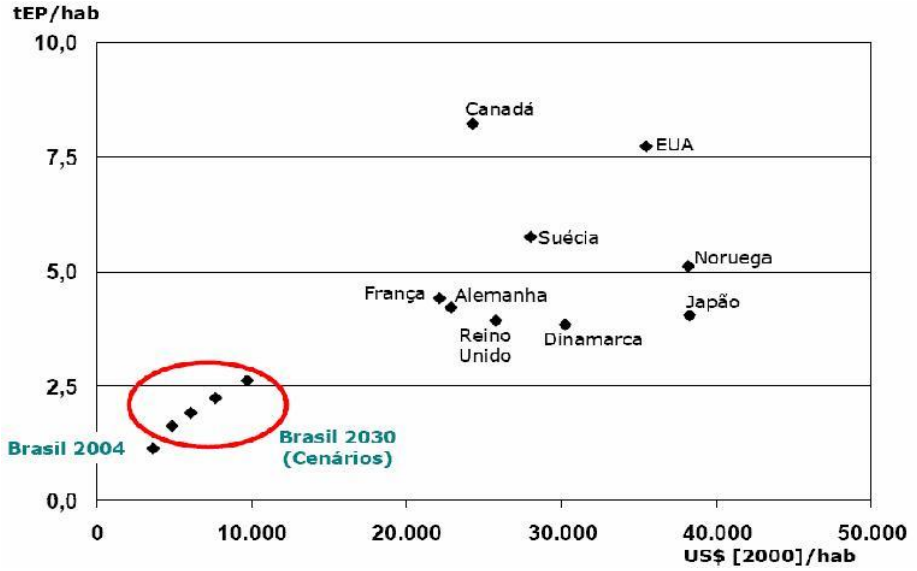

Figura 1 Curva elasticidade x renda

Este gráfico foi extraído do Plano Nacional de Energia, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), e se trata de um estudo prospectivo sobre o setor de energia. São traçados vários cenários, variando-se, por exemplo, índices de crescimento da população, crescimento do produto interno bruto e o uso de fontes alternativas de energia. O fato é que o estudo indica que na pior

das situações haverá um aumento da demanda da ordem de 150%. Mesmo com esse expressivo aumento na produção de energia, em 2030 o país estará bem abaixo da intensidade energética dos países de primeiro mundo.

A produção de energia, como uma atividade antropogênica, provoca impactos no meio ambiente. Ocorrem emissões de CO_2 pelo uso de combustíveis fósseis, resultando no aquecimento global e por conseqüência as mudanças climáticas mundiais. Nesta situação o problema é de todos os países. A percepção de que os recursos naturais são finitos somente ocorreu com os movimentos ambientais da década de 1960/1970. Esse despertar para as questões ambientais foi decorrente de desastres e catástrofes ambientais. Várias foram as constatações resultantes dos estudos das conferências associadas com o meio ambiente que confrontaram a humanidade com o problema ambiental. As pesquisas e negociação em conferências resultaram em algumas direções que se mostram como tentativas de solução para estes problemas. Alguns exemplos que podem ser citados são: o protocolo de Kioto e a Conferência Eco 92 (SOARES et al., 2004).

No enfrentamento das conseqüências ambientais associadas com a questão energética pode-se citar: a pesquisa por energias renováveis e limpas, o uso de sistemas de energia mais eficientes, a busca pelo uso racional e pela conservação da energia.

Em uma economia global não basta que o país seja auto-suficiente em seus recursos e não basta que ele resolva o seu problema. Veja a seguinte situação que acontece hoje: a União Européia defensora das emissões buscam reduzir as suas fontes poluentes, e por outro lado a China, que se trata de um país que possui 1/6 da população mundial em condições de desenvolvimento semelhantes a do Brasil, está buscando o seu desenvolvimento. No entanto, a China se trata de um local onde tudo é grandioso, sendo certamente a questão

energética muito relevante nesse caso, inclusive com capacidade para deslocamento de mercados em âmbito mundial.

O Brasil quando exporta grãos, na realidade está exportando terra, sol e água, pois os países que fazem a aquisição muitas das vezes não possuem os recursos suficientes a produção destes grãos. Quando se exporta aço (e o Brasil é um grande exportador deste produto), exporta-se minério e energia. Essa produção é bastante energo-intensiva e produção de energia deve ser realizada no Brasil. Percebe-se nesses casos claramente que em um comercio global o problema ambiental e energético é na verdade um problema de todos.

Em certas situações não é bom ser auto-suficiente em recursos, como também não é desejável, uma vez que essa condição pode despertar a cobiça dos desfavorecidos, constituindo em um problema de natureza geopolítica. Guerras e invasões de território têm sido realizadas a fim de se assegurar às condições energéticas das nações, principalmente aquelas que já se encontram em situação favorável de desenvolvimento.

O Brasil possui condições privilegiadas para a cultura de biomassa. Pode produzir para alimento e também realizar cultura energética, como por exemplo, cana-de-açucar (para etanol), oleaginosas diversas (biodiesel), capim elefante e eucalipto (madeira energética) dentre outros tipos. O país ainda possui grande potencial eólico (em terra e no mar), insolação acima da média mundial, dada a sua localização nos trópicos, recursos hídricos ainda a serem explorados. Existe também um grande potencial de energia maremotriz, que ainda se encontra em estágios iniciais de desenvolvimento, haja vista a extensa costa marítima. Além disso, o país ainda possui uma grande reserva de mineral de onde se extrai o urânio e uma significativa parte das reservas de água doce do mundo. Sem falar das jazidas de petróleo e gás natural da camada pré-sal.

Toda a fonte de energia deve ser explorada em seu potencial. A EPE vem realizando um excelente trabalho de planejamento energético bastante

alinhado com as tendências mundiais. Apesar de todo o desejo de que a energia seja suprida por fontes renováveis, a realidade mostra que tais fontes ainda são bastante caras, e como a decisão de investimento é principalmente baseada no critério econômico, na maioria das vezes a expansão da geração poderá ser por fontes fósseis, mesmo que o custo ambiental tenha reflexos econômicos nesta avaliação. Para evitar que as fontes não renováveis sejam implementadas se faz necessário que haja políticas de governo que direcionem e privilegiem as fontes renováveis, como é o caso brasileiro do Proalcool e mais recentemente do Proinfa (biomassa, eólica e PCH). Os Programas de eficiência energética são importantes e ajudam a disponibilizar energia para aplicações sem a necessidade de expansão do sistema. No atual estágio da humanidade somente uma mudança no modelo econômico e nos padrões de consumo poderiam fazer com que a expansão usando apenas fontes renováveis suprisse a demanda de energia nova. A questão do licenciamento ambiental e dos seus instrumentos de avaliação de impacto ambiental (EIA/RIMA, PCA, RCA) possuem um papel de grande importância nesse direcionamento.

Acima de tudo é preciso ter em mente de que não adianta condenar as fontes de energia e continuar fazendo um uso intenso, indiscriminado e crescente, pois para evitar um colapso do sistema a energia terá de ser gerada de alguma fonte e a algum preço, que a sociedade certamente estará disposta a pagar, pois a energia mais cara é aquela que não foi produzida quando se precisava dela. Tal posicionamento indica para uma mudança nos padrões de consumo e na busca por eficiência. A Figura 2 mostra a previsão de crescimento de demanda de energia no Brasil (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2006).

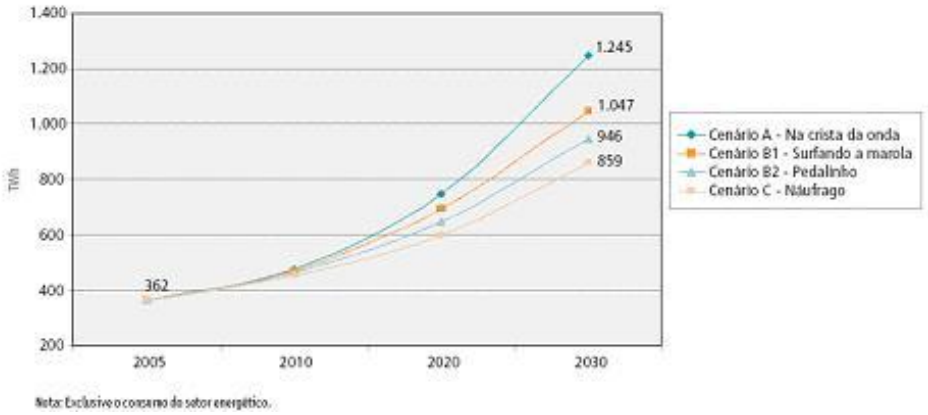

Figura 2 Previsão de aumento de consumo de energia no Brasil

Pensando no aspecto de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e na crescente produção de energia, a fonte nuclear se mostra como uma forma de manter o desenvolvimento, enquanto se evoluem e barateiam as formas de energia renovável. A engenharia está desenvolvendo um reator nuclear de 4ª geração, que diferentemente das gerações anteriores que eram adaptações de reatores de propulsão naval, foi criado para a geração de energia e sendo assim são mais seguros e eficientes. Na visão dos pesquisadores desta área o resíduo é um problema equacionado. De fato, o maior problema no uso desta tecnologia é a segurança da informação e o problema geopolítico associado com a disseminação de tecnologias nucleares.

O mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) e o mercado de carbono se mostram de grande importância na viabilização de empreendimentos e na transferência de tecnologia. Entretanto estudos indicam que atividades e ações de pequeno porte que poderiam contribuir também para a redução das emissões são renegadas, uma vez que um processo de MDL possui um custo elevado. Mas de qualquer forma é um instrumento que se dispõe a tratar e direcionar a questão energética mundial.

As tecnologias recentes, como por exemplo, os veículos elétricos (eficiência acima de 90%) vem para atacar a dependência do petróleo, mas principalmente são sistemas de uso energético mais eficiente do que os motores de combustão interna (eficiências menores que 20%). A chamada economia do hidrogênio, onde as fontes de energia primária produzem gás hidrogênio que é usado em células a combustível, também se encontram alinhadas com o conceito de eficiência energética.

A arquitetura de casas e edificações também tem sido alvo de estudos de racionalização e eficientização energética. Para o futuro se pensa em casas que aproveitem mais a luminosidade natural, a ventilação natural, faça uso de *led* (iluminação moderna e eficiente) e equipamentos eletroeletrônicos de alta eficiência juntamente com aquecimento de água através de coletores solares, telhados na forma de jardins, módulos fotovoltaicos para a geração de energia, coleta seletiva e reuso da água.

O resíduo sólido urbano terá o seu aproveitamento em toda uma cadeia, utilizando os 3R’s (reduzir, reciclar e reutilizar), gerando energia através de biogás ou de incineração e utilizando plasma térmico para tornar o resíduo inerte.

A geração distribuída usará módulos fotovoltaicos, usinas termoelétricas solares, motores Stirling, aerogeradores, microturbinas, que farão parte de uma rede de energia inteligente.

A grande expectativa é de que a energia do futuro seja limpa e renovável, incentivada por política dos governos, gerando créditos de carbono e redução de emissões, e ainda como um importante pilar, não só do desenvolvimento econômico, mas também de desenvolvimento humano em todas as suas dimensões. Nesse aspecto, as tecnologias de produção e uso de hidrogênio na forma de vetor energético assumem grande importância, por

atenderem a diversos dos requisitos ideais para os sistemas energéticos do futuro.

A aplicabilidade das células a combustível resulta em investimentos significativos, principalmente por empresas do ramo automobilístico e energético, em pesquisa e adequação do mercado à inserção desta tecnologia. Tal investimento resulta em inovações e patentes.

A Figura 3 mostra uma síntese das principais formas de produção e uso do hidrogênio como vetor energético. Aproximadamente 95% do hidrogênio produzido no mundo é obtido através do processo de reforma, seguido pelo processo de eletrolise alcalina da água.

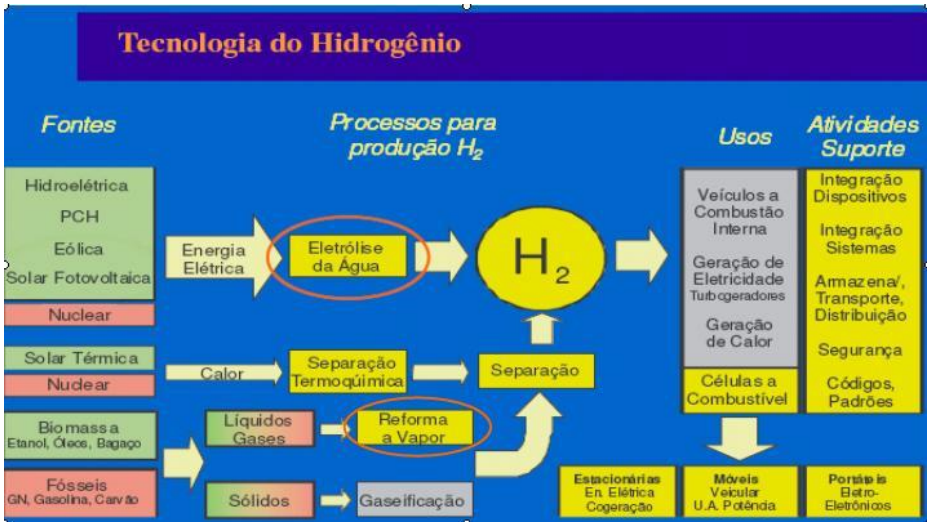

Figura 3 Produção e uso de hidrogênio como vetor energético

2.1 Definição: células a combustível

As células a combustível (CaC) são dispositivos eletroquímicos que convertem a energia química de uma reação em energia elétrica. A célula a combustível é um tipo de bateria, no entanto, não tem carga finita nem necessita de recarga. Produzirá energia elétrica e calor enquanto for abastecida de

combustível. O ponto fundamental da estrutura de uma célula consiste em uma camada de eletrólito em contato com um catodo e um anodo, ambos porosos. Um combustível rico em hidrogênio é alimentado na célula juntamente com o oxigênio, ou ar. O eletrólito só transporta reagentes dissolvidos até o eletrodo, e ainda serve como uma barreira física, impedindo que combustível e gás oxidante sejam misturados. Apesar da alta tecnologia empregada para o seu funcionamento, as células a combustível são conhecidas pela ciência há mais de 150 anos.

2.2 Principais características

As células a combustível têm muitas características que as credenciam como dispositivos de conversão energética. Duas características despertaram grande interesse para aplicação terrestre: a combinação de alta eficiência e intrusão ambiental muito baixa (teoricamente sem emissão de gases ácidos e sólidos).

A eficiência das plantas de células combustíveis atuais se encontra na faixa de 40 a 55%, baseado no poder calorífico inferior do combustível (PCI). Ciclos híbridos de células a combustível e turbinas a gás oferecem eficiências maiores que 70% (PCI).

Além disso, as CaCs operam a temperatura constante, e o calor produzido pela reação eletroquímica pode ser usado em aplicações de co-geração. As plantas de células a combustível podem ser configuradas para atender a diferentes solicitações, variando de Watts a Megawatts. São sistemas silenciosos e flexíveis em termos de combustíveis. Entretanto são sensíveis a certos contaminantes que devem ser minimizados no gás combustível a ser utilizado. A Tabela 1 resume os impactos dos principais constituintes dos gases combustíveis nas várias células combustíveis.

Tabela 1 Impacto dos principais constituintes dos combustíveis nas CaCs.

Constituintes	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H_2	Combust.	Combust.	Combust.	Combust.	Combustível
CO	Veneno	Veneno	Veneno	Combust.	Combustível
CH_4	Diluente	Veneno	Diluente	Diluente	Combustível
CO_2 e H_2O	Diluente	Veneno	Diluente	Diluente	Diluente
H_2S ou COS	Sem estudos	Veneno	Veneno	Veneno	Veneno

(fonte: EG&G TECHNICAL SERVICES INC., 2004)

Outras características que as plantas oferecem são: a conversão direta de energia (sem combustão); nenhuma parte móvel no conversor; alta disponibilidade demonstrada em unidades de baixa temperatura; flexibilidade de combustíveis; resistência e confiabilidade demonstradas de unidades de baixa temperatura; bom desempenho em operações fora do ponto de projeto; instalações modulares para combinar a carga; operação remota; flexibilidade de tamanho; rápida capacidade de fluxo de carga. As principais dificuldades das CaCs incluem o alto custo de entrada no mercado, a tecnologia não-familiar para a indústria de energia e a falta de infra-estrutura.

2.3 Tipos de células a combustível

As células a combustível podem ser classificadas em diversas categorias, dependendo da combinação, do tipo de combustível e oxidante, se o combustível é processado fora (reforma externa) ou dentro (reforma interna) da célula, o tipo de eletrólito, temperatura de operação, até mesmo pela forma de alimentação dos reagentes. A forma de classificação mais utilizada é de acordo com tipo de eletrólito usado na célula e inclui:

- Célula de Eletrólito Polimérico ou Célula de Membrana de Troca de Prótons – PEMFC (80ºC);
- Célula de Eletrólito Alcalino ou Célula Alcalina – AFC (100ºC);
- Célula de Eletrólito de Ácido Fosfórico ou Célula de Ácido Fosfórico – PAFC (200º C);
- Célula de Eletrólito de Carbonato Fundido ou Célula de Carbonato Fundido – MCFC (650º C);
- Célula de Eletrólito de Óxido Sólido ou Célula de Óxido Sólido – SOFC (600 à 1000 ºC).

A Tabela 2 resume as principais características das CaCs, possibilitando a comparação entre as tecnologias. É importante frisar que a escolha de uma tecnologia é principalmente guiada pelo tipo de utilização. A temperatura de operação e a vida útil de uma célula ditam as propriedades físico-químicas e termomecânicas dos materiais usados nos componentes das células, tais como eletrodos, eletrólito, coletores e conectores. A temperatura de operação também tem papel importante na escolha do tipo de combustível que pode ser utilizado.

As células que operam a baixas temperaturas com eletrólitos aquosos são, na maioria das aplicações, restritas a hidrogênio como combustível. Em células de temperaturas de operação altas, CO e até mesmo CH4 podem ser utilizados como combustível por causa da cinética rápida do eletrodo e da menor necessidade de atividade catalítica nessas temperaturas.

BLOMEN E MUGERWA (1993) apresenta de forma bastante profunda os conceitos sobre células a combustível, constituindo-se em um excelente tutorial sobre a tecnologia.

Tabela 2 Comparação entre CaCs e outras formas de geração distribuída

	PEM	PAFC	MCFC	SOFC	μ-GT	*Diesel Engine*	*Stirling Engine*
Eficiência Elétrica - gás natural (AC/LHV), %	35	40	45-50	45-50*	30	35	30
Performance %/1000 h	>1	0.44	0.60	<0.10	0.20	0.20	na
Emissões-gás natural:NO_x,g/MWh	<20	<10	<10	<10	300	700	200
SOx, g/MWh	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1	1	1
Noise, dBA @ 10 m	<60	60	65	65	65	80-90	60
Consumo água gal/MWh	0	90	88	0	0	0	0
Eficiência combustível total-gás natural (AC/LHV), %	35	65	70	80-85	~75	~78	~77

(fonte: EG&G TECHNICAL SERVICES, INC, 2004)

2.4 PEMFC

Esta tecnologia foi inventada pela General Electric nos anos 50 e foi utilizada pela NASA para fornecer energia para o projeto espacial Gemini. Foram construídos dois módulos de 1 kW. Estes módulos eram responsáveis pelo fornecimento da energia primária para cada uma das sete aeronaves Gemini. É no momento a tecnologia de célula a combustível favorita das empresas automobilísticas como substituição aos motores de combustão interna. As PEMFCs também são conhecidas como eletrólito de membrana polimérica ou eletrólito sólido de polímero.

Numa célula a combustível do tipo PEMFC, o eletrólito é uma fina membrana sólida de polímero orgânico (ácido poli-perfluorsulfônico), Nafion™,

que é permeável aos prótons, mas não conduz elétrons nem moléculas de hidrogênio ou oxigênio. Os eletrodos são normalmente feitos de carbono com sítios catalíticos ativados. O eletrólito sólido é uma vantagem, pois reduz os problemas de corrosão e de manutenção. A Figura 4 apresenta um esquema com as principais partes de uma célula do tipo PEMFC.

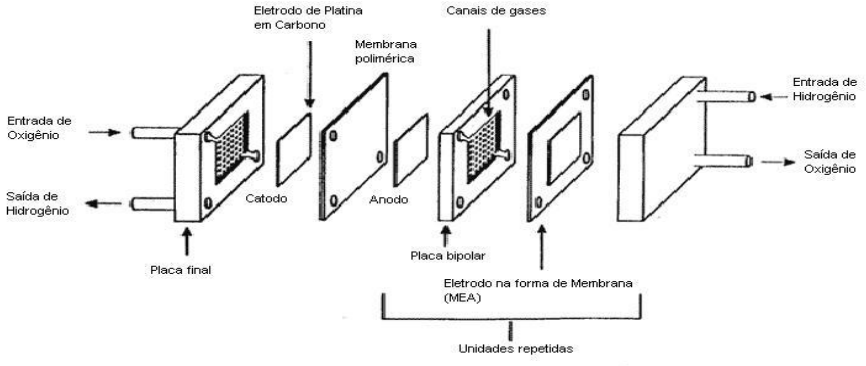

Figura 4 Estrutura de uma célula a combustível do tipo PEMFC

O hidrogênio flui para a CaC através do anodo e então é separado pelo catalisador de platina em íons de hidrogênio (prótons e elétrons). Os prótons de hidrogênio são capturados e atravessam o eletrólito no sentido do catodo, ao mesmo tempo em que os elétrons fluem através de um circuito externo e fornecem energia elétrica (corrente elétrica). O oxigênio, obtido do ar, é fornecido ao catodo e combina com os elétrons e com os íons de hidrogênio (prótons) para produzir água.

As células a combustível PEMFC operam numa temperatura que varia entre 50° a 90°C, mas tipicamente a 80°C. Nesta baixa temperatura as reações eletroquímicas, que normalmente ocorrem numa velocidade bem lenta, são catalisadas por uma fina camada de platina nos eletrodos, o que faz com que as reações ocorram mais rapidamente. Além disso, proporciona uma maior durabilidade dos componentes da célula. Um dos desafios desta tecnologia é encontrar um material catalisador que substitua a platina, de alto custo e rara, e

que mantenha a mesma qualidade na cinética da reação. O coração da PEMFC é o conjunto chamado MEA, composto por eletrodos e eletrólito.

Esta tecnologia tem grandes vantagens que fazem dela a candidata ideal para uso em aplicações automobilísticas e pequenas aplicações domésticas, tal como substituição às baterias convencionais (pilhas). As PEMFCs operam em uma temperatura relativamente baixa, o que permite a elas um início de operação rápida, além de terem uma densidade de potência alta, o que as deixa mais compactas e leves que outras tecnologias. Além disso, elas apresentam alta eficiência, produzindo de 40 a 50% da máxima tensão teórica, e podem variar a saída de potência rapidamente para atender mudanças na demanda de energia.

Atualmente, há no mundo unidades de demonstração em operação gerando uma potência de 50 kW e outras em desenvolvimento produzindo cerca de 250 kW. Entretanto, há ainda algumas barreiras a serem vencidas para que esta tecnologia se torne acessível. A principal questão é o custo dos materiais da membrana e os catalisadores de platina, bastante elevados. Mas as pesquisas e a economia em alta escala levarão a redução de custos e, conseqüentemente, à produção em massa das células a combustível do tipo PEMFC.

Outra questão que também deve ser superada é que as células a combustível PEMFC precisam de hidrogênio puro para operar, pois elas são suscetíveis a contaminação por monóxido de carbono e outras impurezas. Isto se deve principalmente pelo fato de operarem em temperaturas baixas e então terem que utilizar catalisadores muito sensíveis como é a platina. Desta forma, estão sendo conduzidas pesquisas em busca de catalisadores mais tolerantes e que atuem a temperaturas mais altas.

Na indústria automotiva, tanques de hidrogênio no carro são necessários, ou reformadores de combustíveis fósseis, fazendo aumentar os custos. A maioria dos automóveis que utilizam hidrogênio puro deve armazenar o hidrogênio dentro do carro como gás comprimido, em tanques pressurizados. Devido à

baixa densidade de energia do hidrogênio, é difícil armazenar hidrogênio suficiente que permita aos veículos viajarem a mesma distância que um carro que utilize gasolina antes que tenha que ser abastecido.

Os combustíveis com maior densidade de energia, como a gasolina, o metanol, o etanol, o gás natural e o gás liquefeito podem ser utilizados nas células a combustível, mas um processador de combustível – reformador – deve ser utilizado para transformar esses combustíveis em hidrogênio puro. A utilização do reformador libera dióxido de carbono, embora em quantidades muito menores que geradas em carros convencionais que realizam o processo de combustão interna.

Vantagens:

- Eletrólito sólido, excelente resistência ao cruzamento de gás;
- Capacidade de elevar a temperatura de operação rapidamente;
- Opera com alta densidade de corrente.

Desvantagens:

- Opera em temperaturas baixas, assim o calor rejeitado não pode ser aproveitado;
- Densidade de corrente limitada pelo fornecimento de calor e água;
- Baixa tolerância ao monóxido de carbono (CO);
- Alto custo da membrana e dos catalisadores.

As maiores aplicações para as CaCs são a geração de energia elétrica estacionária, incluindo unidades de co-geração, transporte, aplicações espaciais, militares e em produtos portáteis. A tecnologia CaC começou a ganhar impulso a partir dos programas espaciais americanos nos anos 60, 70 até hoje as células servem para fornecer energia para todos os equipamentos a bordo, além de água para os tripulantes e para o resfriamento dos sistemas da nave.

2.5 Células a combustível: desafios tecnológicos

Na tecnologia de células a combustível, os desafios tecnológicos vêm sendo atacados por partes. Nos anos 90 houve um grande avanço na metodologia de produção de materiais catalisadores, visando a diminuição de custo de forma drástica. Com este avanço, atualmente a utilização de platina como material catalisador, já não é um fator importante para o investimento na tecnologia. Atualmente, pesquisadores do mundo inteiro concentram esforços na produção e domínio da tecnologia de placas separadoras. Assim, vencendo mais este desafio tecnológico, as células a combustível passam a ser uma tecnologia dominada. Restando os desafios do armazenamento do combustível (hidrogênio) que com certeza ficará a critério do mercado específico de cada país. Uma vez, dominando os componentes específicos, de acordo com a disponibilidade de cada país, será possível utilizar as diferentes fontes, tais como metanol, etanol, metano, gás natural, hidrogênio, etc.

No Brasil, os primeiros estudos foram iniciados nos anos 80, em algumas importantes universidades (USP-SC; UFRT; UFMG, materiais) e depois em empresas (CEMIG, Clamper, Unitech; Eletrocell).

Para unidades de uso doméstico (0,5 kW); comercial (20 kW) e industrial (250kW) são considerados os custos de gás natural e energia elétrica (base), dados na Tabela 3:

Tabela 3 Custos gás natural e energia elétrica.

Energia elétrica ($/kWh)	Doméstico / Comercial	Industrial
Gás-natural	0,08-0,16	0,04-0,12
(US$/kWh)	0,02-0,04	0,01-0,03

(fonte: CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2003*)*

Os resultados para o investimento ($/kW) “aceitável” em CaC, para vida útil de 5 e 12 anos, respectivamente, são mostrados na Tabela 4:

Tabela 4 Investimento em células combustíveis

Doméstico(0,5 kW)	Comercial(20 kW)	Industrial (250 kW)
600-1400	400-1800	500-800

(fonte: CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2003*)*

No âmbito mundial encontram-se os seguintes estágios de desenvolvimento:

- PEMFC – protótipos automotivos e estacionários sendo demonstrados pela *Ballard Power Systems*;
- AFC – pequeno interesse comercial;
- PAFC – unidades estacionárias disponíveis desde 1992, pela *United Technologies Corp*, Toshiba e Mitsubishi;
- MCFC – protótipos estacionários sendo testados pela *Fuel Cell Energy*;
- SOFC – unidades estacionárias sendo testadas, principalmente pela Siemens.

Para sistemas de energia auxiliares e geração distribuída, as duas principais tecnologias (PEMFC e SOFC), apresentam o grau de desenvolvimento dado pela Figura 5 (fonte: EG&G TECHNICAL SERVICES, INC, 2004)

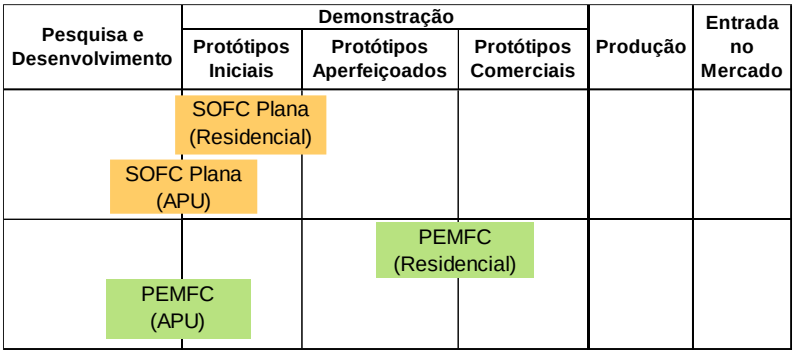

Figura 5 Estado da arte para CaCs para aplicações estacionárias

3 MATERIAIS E MÉTODOS: O CONTROLE PREDITIVO

Nos dias atuais, os processos industriais são predominantemente contínuos, com elevada integração energética e material, sujeitos a restrições, à elevada exigência na especificação do processo e sobre intensa regulação governamental com relação à segurança e ao meio ambiente. Todos estes fatores, aliados a processos complexos requerem um controle de melhor desempenho.

A teoria de controle progrediu à medida que problemas práticos eram resolvidos durante as fases da história humana. No início a análise matemática dos sistemas de controle era feita pelo uso de equações diferenciais no domínio do tempo. Durante os anos de 1920-1930, nos laboratórios Bell, foi desenvolvido o domínio da freqüência por Laplace, Fourier e Cauchy, aplicado aos sistemas de comunicação. A utilização de técnicas do domínio de freqüência em sistemas controle estabelece um paradigma na teoria de controle. Por um lado, a sólida teoria matemática dos servomecanismos e, por outro lado, o desenvolvimento de técnicas de projeto de engenharia.

O período clássico é caracterizado pelo uso direto de ferramentas que utilizam principalmente a intuição e garantem a solução de problemas de projeto. Estas ferramentas são aplicadas usando cálculos manuais, ou na maioria das vezes regras juntamente com técnicas gráficas, resultando em uma faixa de soluções possíveis. O paradigma do controle clássico foi adequado para os problemas de projeto de controle durante e imediatamente após a 2ª guerra mundial. A utilização do domínio de freqüência era adequada para sistemas invariantes no tempo e aplicada em sistemas de uma entrada e uma saída (SISO). A grande vantagem desta técnica reside no fato de que a resposta em freqüência pode ser obtida experimentalmente. Os diagramas de blocos foram utilizados exaustivamente. Infelizmente, tais técnicas não são aplicáveis em sistemas

multivariáveis (MIMO), com não-linearidade avançada e ainda exigem procedimento de tentativa/erro com múltiplas iterações para ajuste, não garantido bons resultados ou mesmo estabilidade em malha fechada (MORARI e ZAFIRIOU, 1989).

Em 1960 ocorreu um grande desenvolvimento na área de tecnologia de computadores digitais. Com os computadores, o controle moderno pode evoluir expressivamente constituindo a teoria de controle ótimo (SARGENT, 2000; SYRMOS et al. 1997). O projeto em controle moderno é fundamentalmente uma técnica no domínio do tempo. É exigido um modelo em espaço de estados do sistema a ser controlado. O poder desta técnica tem origem no fato de que a estrutura deste modelo representa tanto sistemas SISO quanto para sistemas MIMO. Está técnica estabeleceu-se firmemente para sistemas lineares inicialmente. Extensões para sistemas não-lineares puderam ser feitas utilizando-se da teoria de Lyapunov. A garantia de desempenho obtida pela solução do sistema matricial de equações significa que é freqüentemente possível o projeto de controle no sentido estritamente matemático sem qualquer intuição de engenharia sobre o problema, levando a um distanciamento da interpretação física do processo.

Na década de 1970 e posteriormente, três grandes descobertas iniciaram uma nova era na teoria de controle em realimentação (MORARI e ZAFIRIOU, 1989). Em 1976, Youla mostrou que era possível parametrizar todos os controladores estabilizantes para um sistema particular de uma forma bastante efetiva. Em 1981, Zames postula a medida de desempenho em termos da norma-∞, introduzindo a era de controle ótimo H_∞. Por fim, em 1982 Doyle deduziu que a incerteza de modelo é freqüentemente descrita efetivamente em termos de uma perturbação de norma limitada. Para esta perturbação e o índice de desempenho H_∞ foi desenvolvida uma potente ferramenta para teste de "estabilidade robusta" e "desempenho robusto", conhecida como valor singular

estruturado (SSV) e que é provavelmente a motivação primária para o objetivo do moderno controle H_∞.

A Tabela 5 apresenta de forma resumida as diversas técnicas de controle classificando-as segundo seu uso na indústria (SEBORG, 1994).

Tabela 5 Classificação de estratégias de controle segundo seu uso na indústria.

Categoria	Estratégias
Categoria 1	Estratégias convencionais: controle manual; controle PID; controle de relação; controle cascata; controle *feedforward*.
Categoria 2	Controle avançado (técnicas avançadas): *gain scheduling*; compensação de tempo morto; controle por desacoplamento de laços, seleção de controladores.
Categoria 3	Controle avançado (técnicas muito utilizadas): **controle preditivo baseado em modelos (MPC)**; controle estatístico de processos; controle por modelo interno (IMC); controle adaptativo.
Categoria 4	Controle avançado (técnicas mais novas com algumas aplicações industriais): controle ótimo (LGQ); sistemas especialistas; controle não-linear; neuro-controladores; controladores *fuzzy*.
Categoria 5	Controle Avançado (técnicas novas com qualquer aplicação industrial): Controle Robusto (H_∞ e síntese μ)

Dos anos de 1990 até a atualidade percebe-se uma preocupação em se projetar sistemas com controle robusto. Está pode ser uma forma de se incorporar a intuição das técnicas de controle clássico no projeto multivariável moderno. Um exemplo desta preocupação é a classe da teoria de controle que se preocupa com a melhoria no desempenho em qualquer ponto de operação e incerteza.

3.1 Controle preditivo baseado em modelo (MPC)

O interesse em aplicações industriais usando o MPC situa-se no início da década de 1970. Em 1978, RICHARD et al. *apud* GARCIA (1989) descreveu com sucesso aplicações de MPC na forma de MAC (*Model Algoritmic Control*).

Em 1979, engenheiros da Shell esboçaram a DMC (*Dynamic Matrix Control* – Cutler; Ramaker,1979; Prett e Gillette,1979) e relataram aplicações para o processamento de petróleo. Em ambos os algoritmos um modelo dinâmico explícito da planta foi usado para prever os efeitos de ações futuras das variáveis manipuladas nas saídas. Os movimentos futuros das variáveis manipuladas são determinados por otimização com o objetivo de minimizar os erros de predição sujeitos às restrições de operação. A otimização é repetida a cada instante de amostragem baseada na atualização dos dados de medidas da planta. O problema de MPC é formulado como um problema dinâmico de otimização. Desde 1978 ocorreu uma popularização deste controlador, principalmente em indústrias ligadas a processos químicos. Em 1985 Morshedi usa uma função objetivo linear e incorpora restrições explícitas gerando o algoritmo LDMC (*Linear Dynamic Matrix Control*). Em 1986 GARCIA e MORSHEDI (1986) discutem uma extensão da formulação DMC incorporando uma função quadrática e restrições chamando-o de QDMC (*Quadratic Dynamic Matrix Control*). GARCIA (1989) relatou inúmeras aplicações. O princípio para desenvolver técnicas de programação não-linear baseou-se em uma extensão do QDMC para processos não-lineares chamada NLQDMC (*NonLinear Quadratic Dynamic Matrix Control*) como foi apresentada por GATTU e ZAFIRIOU (1992).

De maneira geral os diferentes algoritmos de MPC são formulados no instante presente k e considerando um horizonte P, como ilustra a Figura 6. Usando a resposta do modelo do processo a variações, as variáveis manipuladas são preditas. A ação da variável manipulada é selecionada de tal forma que a resposta predita possui certas características desejadas. Apenas a primeira ação é implementada e no instante k+1, é feita uma atualização das medidas da planta e feito um novo cálculo para as variáveis manipuladas e saídas no horizonte de predição, se algo ocorrer na planta, durante este intervalo, por exemplo, um ruído ou uma perturbação, isto será detectado e antes que possa interferir na

atividade da planta será implementada uma ação a fim de corrigir e manter a mesma sob controle.

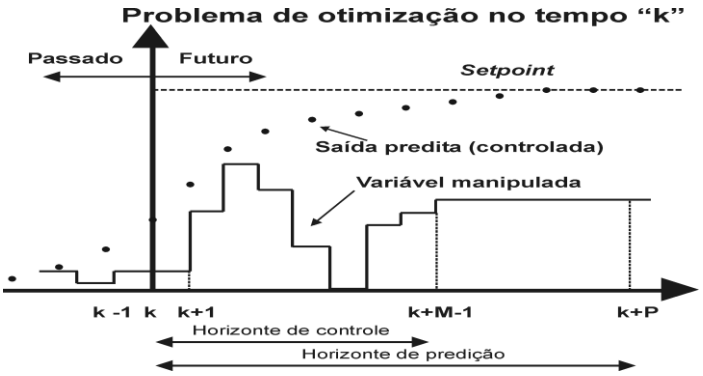

Figura 6 Horizonte de ações, centro da teoria de MPC

No controle clássico a atuação do controle ocorre somente após a existência de um desvio em relação ao ponto de trabalho desejado. No controle moderno, e principalmente na família de controladores preditivos a atuação de controle ocorre não somente pelo uso do desvio, mas também pela implementação de trajetórias desejadas. A Figura 7 ilustra de forma bastante clara as vantagens do controle preditivo sobre o controle clássico. Fazendo um comparativo de processo com a direção de um veículo, o controle clássico seria como um motorista que dirige usando apenas o retrovisor (passado). Fazer uso dos retrovisores e da trajetória que se deseja seria uma direção alinhada com as idéias do controle preditivo.

Figura 7 Controle clássico x controle preditivo

3.1.1 MPC com horizonte infinito

Dado o sistema na forma discretizada apresentado nas Eqs. 1-2, onde **A** é a matriz de estado, **B** a matriz de entradas, **C** é a matriz de saídas e **D** é a matriz de transmissão direta, **x** é o vetor de estados, **y** é o vetor de saídas e **u** é o vetor de ações de controle.

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \tag{1}$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \tag{2}$$

O MPC com horizonte de controle infinito (IHMPC – *Infinite Horizon Model Predictive Control* -MUSKE E RAWLINGS, 1993) é definido em que o movimento de controle $\mathbf{u}_k$, no instante de amostragem k, é dado pelo primeiro elemento $\mathbf{u}_{k|k}$ de Ξ:$\{\mathbf{u}_{k|k}, \mathbf{u}_{k+1|k}, \ldots, \mathbf{u}_{k+Nm-1|k}\}$ na forma da Eq. 3. Esta equação pode ser manipulada algebricamente resultando na Eq. 4, que transforma o horizonte de controle de infinito para horizonte finito. A seqüência de ações de controle é a solução do problema de otimização dado pelas Eq. 5-7, com: $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T \geq \mathbf{0}$, $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T > \mathbf{0}$, $\mathbf{S} = \mathbf{S}^T \geq \mathbf{0}$, $\overline{\mathbf{Q}} = \mathbf{C}^T\mathbf{Q}\mathbf{C} + \mathbf{A}^T\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{A}$ (Equação de Lyapunov), e $\Delta\mathbf{u}_{k+j} = \mathbf{u}_{k+j} - \mathbf{u}_{k+j-1}$. No instante $k + N_m$,e posteriormente, o vetor de entradas **u** é um vetor de zeros e **z** representa o vetor de estados reais medidos ou estimados das saídas medidas.

$$J_k = \min_{\mathbf{u}} \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{y}_{k+i}^T \mathbf{Q}\mathbf{y}_{k+i} + \mathbf{u}_{k+i}^T \mathbf{R}\mathbf{u}_{k+i} + \Delta\mathbf{u}_{k+i}^T \mathbf{S}\Delta\mathbf{u}_{k+i} \tag{3}$$

$$J_k = \min_{\Xi} \Xi^T \mathbf{H}\Xi + 2\Xi^T(\mathbf{G}\mathbf{z}_k - \mathbf{F}\mathbf{u}_{k-1}) \tag{4}$$

Os termos do índice de otimização dado pela Eq. 4 são mostrados a seguir:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^T\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{B} + \mathbf{R} + 2\mathbf{S} & \mathbf{B}^T\mathbf{A}^T\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{B} - \mathbf{S} & \cdots & \mathbf{B}^T\mathbf{A}^{T^{N_m-1}}\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{A}\mathbf{B} - \mathbf{S} & \mathbf{B}^T\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{B} + \mathbf{R} + 2\mathbf{S} & \cdots & \mathbf{B}^T\mathbf{A}^{T^{N_m-2}}\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{B} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{B}^T\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{A}^{N_m-1}\mathbf{B} & \mathbf{B}^T\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{A}^{N_m-2}\mathbf{B} & \cdots & \mathbf{B}^T\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{B} + \mathbf{R} + 2\mathbf{S} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{A} \\ \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{A}^{2} \\ \vdots \\ \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\overline{\mathbf{Q}}\mathbf{A}^{\mathrm{N_m}} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{7}$$

A fim de se completar a formulação são inseridas as restrições de entrada, de saída e de variação de entrada, resultando na formulação completa dada pela Eq. 8.

$$\mathrm{J_k} = \min_{\boldsymbol{\Xi}} \boldsymbol{\Xi}^{\mathrm{T}}\mathbf{H}\boldsymbol{\Xi} + 2\boldsymbol{\Xi}^{\mathrm{T}}(\mathbf{G}\mathbf{z}_{\mathrm{k}} - \mathbf{F}\mathbf{u}_{\mathrm{k-1}})$$

Sujeito à: (8)

$$\mathbf{u}_{\min} < \mathbf{u} < \mathbf{u}_{\max}$$

$$\Delta\mathbf{u} < \Delta\mathbf{u}_{\max}$$

3.2 MPC Com restrições implementado

A fim de simplificar a nomenclatura, o tempo discreto será representado apenas por k. Desta forma o sistema discretizado apresenta a forma mostrada nas equações Eq. 9-10:

$$\mathbf{x}(\mathrm{k}+1) = \boldsymbol{\Phi}\mathbf{x}(\mathrm{k}) + \boldsymbol{\Gamma}\mathbf{u}(\mathrm{k}) \tag{9}$$

$$\mathbf{y}(\mathrm{k}) = \mathbf{C}\mathbf{x}(\mathrm{k}) + \mathbf{D}\mathbf{u}(\mathrm{k}) \tag{10}$$

As entradas do sistema podem ser de vários tipos, como mostra a Figura 8 e a Eq. 11.

$$\mathbf{u}^{\mathrm{T}}(\mathrm{k}) = \begin{bmatrix} \mathbf{m}^{\mathrm{T}}(\mathrm{k}) & \mathbf{v}^{\mathrm{T}}(\mathrm{k}) & \mathbf{w}^{\mathrm{T}}(\mathrm{k}) & \mathbf{z}^{\mathrm{T}}(\mathrm{k}) & \mathbf{e}^{\mathrm{T}}(\mathrm{k}) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

Onde $\mathbf{m}^T(k)$ é um vetor de m variáveis manipuladas, ou sinais de controle, $\mathbf{v}(k)$ é um vetor de perturbações medidas e **w**(k), **z**(k) e **e**(k) são vetores de perturbações não medidas. As matrizes **Γ**e **D** são particionadas como mostram as Eq. 12-13.

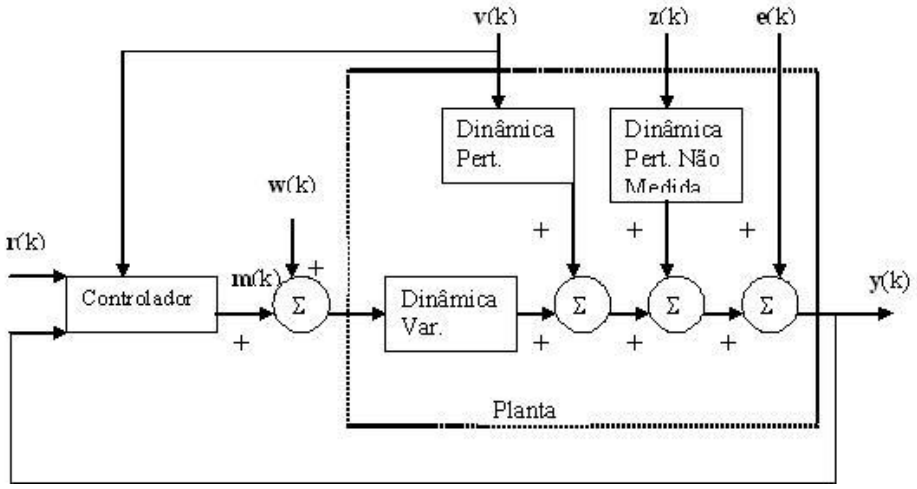

Figura 8 Diagrama de blocos da planta e do sistema de controle

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_m & \mathbf{\Gamma}_v & \mathbf{\Gamma}_w & \mathbf{\Gamma}_z & \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{D}_v & \mathbf{0} & \mathbf{D}_z & \mathbf{I} \end{bmatrix} \tag{13}$$

É importante observar que e(k) não afeta os estados, mas apenas as saídas de forma direta. Um modelo interno desenvolve a predição futura das saídas, como uma função que contempla ajustes das variáveis manipuladas e estimativas das perturbações. O controlador escolhe os valores de u para enviar para a planta de maneira tal que as saídas preditas da planta sejam otimizadas segundo algum critério. O modelo interno é parte do sistema de controle e todos os estados são conhecidos exatamente diferentemente da planta real. Além disso a estrutura e parâmetros do modelo interno também são conhecidos, como mostram as Eq. 14-15.

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \tilde{\mathbf{\Phi}}\tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\mathbf{\Gamma}}\tilde{\mathbf{u}}(k) \tag{14}$$

$$\tilde{\mathbf{y}}(k) = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\mathbf{D}}\tilde{\mathbf{u}}(k) \tag{15}$$

O número de estados é n. O vetor de entradas é definido na equação 16.

$$\mathbf{u}^T(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{m}^T(k) & \mathbf{v}^T(k) & \tilde{\mathbf{w}}^T(k) & \tilde{\mathbf{z}}^T(k) \end{bmatrix}^T \tag{16}$$

Onde as variáveis $\tilde{\mathbf{w}}(k)$ e $\tilde{\mathbf{z}}(k)$ são perturbações não medidas de comprimento m e mz respectivamente e as matrizes $\tilde{\mathbf{\Gamma}}$ e $\tilde{\mathbf{D}}$, como no caso para a planta são particionadas e mostradas nas Eq. 17-18.

$$\tilde{\mathbf{\Gamma}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{\Gamma}}_m & \tilde{\mathbf{\Gamma}}_v & \tilde{\mathbf{\Gamma}}_w & \tilde{\mathbf{\Gamma}}_z \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\tilde{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{D}}_v & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{D}}_z \end{bmatrix} \tag{18}$$

Analogamente ao procedimento para LQG (Linear Quadratic Gaussian) assume-se que perturbações futuras não medidas serão zero e usa-se o modelo interno para estimar os estados futuros da planta, como mostram as Eq. 19-20.

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \tilde{\mathbf{\Phi}}\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{\Gamma}}_m\mathbf{m}(k) + \tilde{\mathbf{\Gamma}}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{K}_{MPC}\hat{\mathbf{d}}(k|k) \tag{19}$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k|k-1) = \tilde{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{D}}_v\mathbf{v}(k) \tag{20}$$

Onde $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$ são os estados futuros estimados no período de amostragem k+1 baseados na informação disponível no instante k, $\hat{\mathbf{y}}(k|k-1)$ são as saídas da planta estimadas no instante k baseadas na informação do instante k-1, KMPC é a constante de ganho do estimador e $\hat{\mathbf{d}}$ é o valor de erro corrente do estimador apresentado na Eq.21.

$$\hat{\mathbf{d}}(k|k) = \mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k|k-1) \tag{21}$$

O modelo de referência representa a resposta desejada para a planta para uma variação de setpoint. Estas equações são mostradas nas Eq. 22-23.

$$\mathbf{x}_r(k+1) = \mathbf{\Phi}_r\mathbf{x}_r(k) + \mathbf{\Gamma}_r\mathbf{u}_r(k) \tag{22}$$

$$\mathbf{y}_r(k) = \mathbf{C}_r\mathbf{x}_r(k) + \mathbf{D}_r\mathbf{u}_r(k) \tag{23}$$

Onde $\mathbf{x}_r$ é um vetor de estados, $\mathbf{y}_r$ é a referência de saídas. A meta do procedimento de projeto do controlador será forçar $\hat{\mathbf{y}}$ para $\mathbf{y}_r$ tão de perto quanto possível, satisfazendo ainda as restrições do processo. As matrizes são um conjunto de parâmetros ajustáveis que podem ser usados para moldar a resposta de sistema de laço fechado, constituído assim numa proposta de robustez. Os coeficientes das matrizes são blocos em diagonal como mostram as Eq. 24-28.

$$\mathbf{\Phi}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{r1} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{\Phi}_{rp} \end{bmatrix} \tag{24}$$

$$\mathbf{\Gamma}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_{r1} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{\Gamma}_{rp} \end{bmatrix} \tag{25}$$

$$\mathbf{C}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{r1} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{C}_{rp} \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$\mathbf{D}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{r1} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{D}_{rp} \end{bmatrix} \tag{27}$$

Então a resposta de cada referência de saída depende apenas da correspondente entrada, isto é, as respostas ideais são desacopladas. Para que o sistema possua performance livre de offset a matriz de ganho de cada subsistema diagonal deve ser unitária. O uso de subsistemas de primeira ordem simplifica a sintonia on-line. Neste caso os elementos das matrizes Γr e Φr são escalares e escolhe-se apenas p parâmetros para especificar o modelo de referência. Os sinais de entrada para o modelo de referência devem ser definidos. No estado

estacionário é desejado que $\hat{\mathbf{y}}(\infty)$ = r(∞), onde r é o vetor de setpoints.Como sempre existem erros no modelo interno, não se pode esperar que $\hat{\mathbf{d}}(\infty)$=y(∞)-$\hat{\mathbf{y}}(\infty)$ vá para zero.Como resultado a entrada do modelo de referência é como mostrado na Eq. 28.

$$\mathbf{u}_r(k) = \mathbf{r}(k) - \hat{\mathbf{d}}(k \mid k) \tag{28}$$

Como o modelo de referência possui ganho unitário para cada subsistema diagonal, no estado estacionário e o sistema é capaz de forçar $\hat{\mathbf{y}}$ para yr, obtém-se a Eq. 29.

$$\mathbf{y}_r = \mathbf{r} - \tilde{\mathbf{y}} + \mathbf{y}_r \tag{29}$$

Ou seja, $\mathbf{r} = \tilde{\mathbf{y}}$, que é o resultado desejado.

O problema do controle inicia-se com a definição do período de amostragem (k). É necessário obter a medida das saídas da planta, $\mathbf{y}(k)$, e medir as perturbações, $\mathbf{v}(k)$, e calcular os estado estimado, $\hat{\mathbf{x}}(k \mid k-1)$,e estimar os erros, $\hat{\mathbf{d}}(k \mid k)$, usando as Eq. 19 e Eq. 21 para encontrar o melhor valor para as variáveis manipuladas, m(k). Este sinal será enviado para a planta e mantido constante durante o restante do período de amostragem. Para determinar se uma dada escolha de m(k) é ótima, deve-se ser capaz de prever os efeitos nas saídas da planta. No MPC isto é feito considerando-se um horizonte finito de períodos de amostragem, M, partindo-se do período k+1. O estimador de estados apresentados nas Eq. 19-21 são as bases para a predição. É necessária a relação entre os valores estimados futuros de erros e a perturbação não medida. A aproximação padrão apresentada nas Eq. 30-31 será considerada nesta formulação.

$$\mathbf{v}(k+i \mid k) = \mathbf{v}(k), \text{ para i=1, M} \tag{30}$$

$$\hat{\mathbf{d}}(k+i \mid k) = \hat{\mathbf{d}}(k \mid k) \text{ para i=1, M} \tag{31}$$

A equação 31 é requerida a fim de eliminar offset de estado estacionário. Definindo-se m(k+i|k) para ser o valor ótimo da variável manipulada no período k+i, baseado na informação disponível no período k, onde i=0, M-1. Repetindo o uso das Eq. 6.20 e 6.21 e considerando as Eq. 6.31 e 6.32 chega-se à equação de predição apresentada na Eq. 32.

$$\boldsymbol{\psi}(k) = \mathbf{H}\boldsymbol{\mu}(k) + \mathbf{Y}_x\hat{\mathbf{x}}(k \mid k-1) + \mathbf{Y}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{Y}_d\hat{\mathbf{d}}(k \mid k) \tag{32}$$

Onde $\boldsymbol{\psi}(k)$ é um vetor das saídas estimadas, como mostra a equação 33

$$\boldsymbol{\psi}(k) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{y}}^T(k+1 \mid k) & \hat{\mathbf{y}}^T(k+2 \mid k) & \cdots & \hat{\mathbf{y}}^T(k+M \mid k) \end{bmatrix}^T \tag{33}$$

e $\boldsymbol{\mu}(k)$ é o vetor de valores futuros das variáveis manipuladas, como mostra a Eq. 34:

$$\boldsymbol{\mu}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{m}^T(k \mid k) & \mathbf{m}^T(k+1 \mid k) & \cdots & \mathbf{m}^T(k+M-1 \mid k) \end{bmatrix}^T \tag{34}$$

A matriz de resposta pulso H, e as matrizes Yx,Yv e Yd são constantes e são mostradas nas Eq. 35-39.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_2 & \mathbf{H}_1 & \mathbf{0} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ \mathbf{H}_{M-1} & \mathbf{H}_{M-2} & & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_M & \mathbf{H}_{M-1} & \cdots & \mathbf{H}_1 \end{bmatrix} \tag{35}$$

$$\mathbf{Y}_x = \begin{bmatrix} (\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\boldsymbol{\Phi}})^T & (\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\boldsymbol{\Phi}}^2)^T & \cdots & (\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\boldsymbol{\Phi}}^M)^T \end{bmatrix}^T \tag{36}$$

$$\mathbf{Y}_v = \left[(\mathbf{H}_{v1})^T \quad (\mathbf{H}_{v1} + \mathbf{H}_{v2})^T \quad \cdots \quad (\sum_{k=1}^{M} \mathbf{H}_{vk})^T \right]^T \tag{37}$$

$$\mathbf{Y}_d = \left[(\tilde{\mathbf{C}}\mathbf{K})^T \quad (\tilde{\mathbf{C}}(\tilde{\boldsymbol{\Phi}} + \mathbf{I})\mathbf{K})^T \quad \cdots \quad (\tilde{\mathbf{C}}(\sum_{k=1}^{M} \tilde{\boldsymbol{\Phi}}^{k-1})\mathbf{K})^T \right]^T \tag{38}$$

As matrizes Hi e Hvi necessárias para o cálculo das matrizes anteriores são mostradas nas Eq.39-40.

$$\mathbf{H}_i = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\boldsymbol{\Phi}}^{i-1}\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}_m \text{ para i=1, M} \tag{39}$$

$$\mathbf{H}_{iv} = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{\Phi}}^{i-1}\tilde{\mathbf{\Gamma}}_{v} + \tilde{\mathbf{D}}_{v} \text{ para i=1, M} \quad (40)$$

A saída do modelo de referência de maneira similar é calculado e mostrado na Eq.41, onde ψr e μr são mostrados nas equações Eq. 42 e 43. Estes termos são os valores preditos para as saídas da referência e os valores de entrada para a referência do instante presente e os valores futuros estimados.

$$\boldsymbol{\psi}_r(k) = \mathbf{H}_r\boldsymbol{\mu}_r(k) + \mathbf{Y}_{xr}\mathbf{x}_r(k) \quad (41)$$

$$\boldsymbol{\psi}_r(k) = \left[\hat{\mathbf{y}}_r{}^T(k+1|k) \quad \hat{\mathbf{y}}_r{}^T(k+2|k) \quad \cdots \quad \hat{\mathbf{y}}_r{}^T(k+M|k) \right]^T \quad (42)$$

$$\boldsymbol{\mu}_r(k) = \left[\mathbf{u}_r{}^T(k) \quad \mathbf{u}_r{}^T(k+1|k) \quad \cdots \quad \mathbf{u}_r{}^T(k+M-1|k) \right]^T \quad (43)$$

Nas Eq. 44-46 são mostradas as matrizes Hr,Hri e Yxr respectivamente.

$$\mathbf{H}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{r1} & & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \\ \mathbf{H}_{rM} & & \mathbf{H}_{r1} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\mathbf{H}_{ri} = \mathbf{C}_r\mathbf{\Phi}_r{}^{i-1}\mathbf{\Gamma}_r + \mathbf{D}_r, \text{ para i=1, M} \quad (45)$$

$$\mathbf{Y}_{xr} = \left[(\mathbf{C}_r\mathbf{\Phi}_r)^T \quad (\mathbf{C}_r\mathbf{\Phi}_r{}^2)^T \quad \cdots \quad (\mathbf{C}_r\mathbf{\Phi}_r{}^M)^T \right]^T \quad (46)$$

O comportamento desejado para as saídas é representado por ψr(k) é dever ser conhecido para definir o problema de otimização. Partindo-se do período de amostragem k, conhece-se xr(k) e assumindo um valor futuro para r de forma que ψr possa ser calculado. Os valores futuros para $\hat{\mathbf{d}}$ são dados pela Eq. 31. Então $\mathbf{u}_r{}^T(k) = \hat{\mathbf{u}}_r{}^T(k+1|k) = \ldots = \hat{\mathbf{u}}_r{}^T(k+M-1|k)$, obtendo a matriz Hr na forma da Eq. 47, ou seja o controlador será otimizado para uma variação na forma de degrau sustentado.

$$\mathbf{H}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{r1} \\ \mathbf{H}_{r1} + \mathbf{H}_{r2} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{M} \mathbf{H}_{ri} \end{bmatrix} \tag{47}$$

As variáveis manipuladas, μ(k), são calculadas de forma a minimizar a função objetivo mostrada na Eq. 48.

$$J = \min_{\boldsymbol{\mu}(k)} \left\{ \left[\boldsymbol{\psi}_r(k) - \boldsymbol{\psi}(k) \right]^T \mathbf{Q}_{MPC} \left[\boldsymbol{\psi}_r(k) - \boldsymbol{\psi}(k) \right] + \Delta\boldsymbol{\mu}^T(k) \mathbf{R}_{MPC} \Delta\boldsymbol{\mu}(k) \right\} \tag{48}$$

Sujeito as inequações de restrição mostradas nas Eqs. .

$$\boldsymbol{\mu}(k) \geq \boldsymbol{\mu}_{min}(k) \tag{49}$$

$$\boldsymbol{\mu}(k) \leq \boldsymbol{\mu}_{max}(k) \tag{50}$$

$$\left| \Delta\boldsymbol{\mu}(k) \right| \leq \Delta\boldsymbol{\mu}_{max}(k) \tag{51}$$

$$\boldsymbol{\psi}(k) \geq \boldsymbol{\psi}_{min}(k) \tag{52}$$

$$\boldsymbol{\psi}(k) \leq \boldsymbol{\psi}_{max}(k) \tag{53}$$

Onde $\Delta\boldsymbol{\mu}(k)$ é definido na Eq. 54.

$$\Delta\boldsymbol{\mu}(k) = \mathbf{R}_{\Delta}\boldsymbol{\mu}(k) - \boldsymbol{\delta}(k) \tag{54}$$

e R_Δ e δ são definidos nas Eqs. 55-56.

$$\mathbf{R}_{\Delta} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \vdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{I} & & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & & & \cdots & & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & -\mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \tag{55}$$

$$\boldsymbol{\delta}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{m}^T(k-1) & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \tag{56}$$

As matrizes Q e R são parâmetros de ajuste para o MPC não-negativos. A inequação 49 é necessária para a formulação do problema QP, as demais são

opcionais. Resolvendo-se o sistema por métodos da programação quadrática, define-se a variável independente como mostrada na Eq. 57 e deve ser positivo para toda solução possível.

$$\mathbf{v}(k) = \boldsymbol{\mu}(k) - \boldsymbol{\mu}_{min}(k) \tag{57}$$

O problema de otimização apresentado na Eq. 6.49 é rearranjado na forma da Eq. 58.

$$J = \max_{\mathbf{v}(k)} \left\{ \mathbf{a}^T(k)\mathbf{v}(k) - \tfrac{1}{2}\mathbf{v}(k)^T \mathbf{B}_{MPC}\mathbf{v}(k) \right\} \tag{58}$$

Sujeito às restrições expressa na Eq. 59.

$$\mathbf{A}_{MPC}\mathbf{v}(k) \le \mathbf{b}(k) \tag{59}$$

Onde as matrizes $\mathbf{a}(k)$, $\mathbf{B}_{MPC}$, $\mathbf{A}_{MPC}$, e $\mathbf{b}(k)$ são mostradas nas Eqs. 60-63.

$$\begin{aligned}\mathbf{a}(k) = \mathbf{H}^T\mathbf{Q}_{MPC}\left[\boldsymbol{\psi}_r(k) - \mathbf{Y}_r\mathbf{x}(k \mid k-1) - \mathbf{Y}_v\mathbf{v}(k) - \mathbf{Y}_d\mathbf{d}(k \mid k) \right] + \\ \mathbf{R}_\Delta{}^T\mathbf{R}_{MPC}\boldsymbol{\delta}(k) - \mathbf{B}^T\mathbf{v}(k)\end{aligned} \tag{60}$$

$$\mathbf{B}_{MPC} = \mathbf{H}^T\mathbf{Q}_{MPC}\mathbf{H} + \mathbf{R}_\Delta{}^T\mathbf{R}_{MPC}\mathbf{R}_\Delta \tag{61}$$

$$\mathbf{A}_{MPC} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{R}_\Delta \\ -\mathbf{R}_\Delta \\ -\mathbf{H} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} \tag{62}$$

$$\mathbf{b}(k) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_{max}(k) - \boldsymbol{\mu}_{min}(k) \\ \Delta\boldsymbol{\mu}_{max}(k) + \boldsymbol{\delta}(k) - \mathbf{R}_\Delta\boldsymbol{\mu}_{min}(k) \\ \Delta\boldsymbol{\mu}_{max}(k) + \boldsymbol{\delta}(k) + \mathbf{R}_\Delta\boldsymbol{\mu}_{min}(k) \\ -\boldsymbol{\Psi}_{min}(k) + \mathbf{H}\boldsymbol{\mu}_{min}(k) + \mathbf{Y}_x\hat{\mathbf{x}}(k \mid k-1) + \mathbf{Y}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{Y}_d\hat{\mathbf{d}}(k \mid k) \\ \boldsymbol{\Psi}_{max}(k) - \mathbf{H}\boldsymbol{\mu}_{min}(k) + \mathbf{Y}_x\hat{\mathbf{x}}(k \mid k-1) + \mathbf{Y}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{Y}_d\hat{\mathbf{d}}(k \mid k) \end{bmatrix} \tag{63}$$

O valor ótimo de $\mathbf{v}(k)$ é solução do conjunto de equações mostrado na Eq. 64, como mostrou RICKER (1990).

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{B}_{\mathrm{MPC}} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & -\mathbf{A}_{\mathrm{MPC}}{}^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{A}_{\mathrm{MPC}} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}(\mathrm{k}) \\ \zeta(\mathrm{k}) \\ \boldsymbol{\lambda}_{\nu}(\mathrm{k}) \\ \boldsymbol{\lambda}_{\zeta}(\mathrm{k}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{a}(\mathrm{k}) \\ \mathbf{b}(\mathrm{k}) \end{bmatrix} \tag{64}$$

Onde $\boldsymbol{\zeta}(\mathrm{k})$ são as variáveis de folga com apresenta Eq. 65 e $\lambda\nu$ e $\lambda\zeta$ são os multiplicadores de Lagrange.

$$\boldsymbol{\zeta}(\mathrm{k}) = \mathbf{b}(\mathrm{k}) - \mathbf{A}_{\mathrm{MPC}}\mathbf{v}(\mathrm{k}) \tag{65}$$

Essa formulação descreve o algoritmo implementado no toolbox MPC do Matlab®.

4 MATERIAIS E MÉTODOS: MODELAGEM DINÂMICA

Quanto melhor o modelo matemático utilizado para representar as características reais da planta, mais eficiente será o esquema de controle baseado nesse modelo. Infelizmente, a complexidade do modelo matemático é diretamente ligada à representação real dos processos. Dessa forma, um controlador que se baseia em um modelo incorreto de um dado processo pode levar o sistema a um comportamento completamente diferente do previsto (SILVA, 2009). As diferenças de modelagem naturalmente são atribuídas como incertezas do modelo, e podem ter muitas origens, como: parâmetros de modelo linear aproximados com erro; parâmetros do modelo linear variando devido à característica não linear dos sistemas reais associados com o ponto de operação; imperfeições na medida; modelos e estruturas desconhecidos em altas freqüências; escolha de modelos mais simples, negligenciando dinâmicas como incertezas; controlador implementado diferentemente do controlador sintetizado. De maneira geral, as limitações dos sistemas podem ser impostas por: tempo morto, fase não-mínima, pólos instáveis, perturbação do sistema, restrições na entrada, atraso de fase e incerteza (HOLT; MORARI, 1985a; 1985b; MORARI, ZAFIRIOU; HOLT ,1987; MORARI, 1983; HAVRE, 1998).

Os modelos no MPC são utilizados para a predição do que irá acontecer nas trajetórias futuras. A forma como o sistema irá encontrar a trajetória desejada será indicada pela função objetivo e dependerá dos sinais presentes e futuros de controle e da incerteza. Por conseqüência, pode-se notar que a faixa dos comportamentos possíveis será sempre maior que o comportamento real da dinâmica do processo. Por essa razão, o controlador projetado baseado em modelo de incerteza é sempre conservador em suas ações (CHRISTEN et al., 1997). Os modelos matemáticos, em especial os modelos para controle, podem descrever a dinâmica de um processo apenas de forma aproximada

(WEINMANN, 1991). A maioria das técnicas de projeto de MPC necessita de um modelo de controle da planta com estrutura e parâmetros fixos, que serão utilizados no procedimento de projeto. O controle robusto considera explicitamente as discrepâncias entre o modelo e o processo real. As incertezas podem ser definidas sobre a capacidade de predição do modelo (CAMACHO; BORDONS, 1999). Como parte dos esforços de modelagem, é necessário obter uma descrição apropriada para a descrição das incertezas. Por um lado, a descrição de incerteza deve ser justa, não contemplando modelos extras ou situações irreais, devendo haver o compromisso entre o realismo e o resultado da complexidade computacional da síntese e análise do controlador.

A questão de modelagem matemática se torna crucial para um controle preciso e que o controle preditivo pode assegurar desempenho e estatbilidade aos sistemas que controla. Essas são características extremamente desejáveis para o controle de células a combustível. A estabilidade e confiabilidade destes equipamentos ainda hoje se constituem em gargalos e desenvolvimentos nessas áreas acarretam em significativos impactos para a tecnologia. O controle rápido e adequado pode ser capaz não só de manter o sistema em perfeito funcionamento, como também garantir a qualidade da energia produzida e proteger a sua vida útil. De forma a realizar este trabalho foi feita uma pesquisa bibliográfica, resultando em alguns modelos de processo de produção de hidrogênio e de células a combustível, que serão submetidos aos estudos de controle de processo. Buscou-se selecionar modelos na forma de espaço de estados, adequados para a formulação clássica de controle MPC, não havendo assim desenvolvimentos ou adaptações dos algoritmos de controle. Uma constatação que pode ser feita é que existem poucos modelos disponíveis na literatura para aplicação de controles lineares. Muitas das formulações encontradas tratam-se de modelos não lineares cuja forma linearizadas resultam em estruturas impróprias para a aplicação de controladores da família MPC

clássica. Outra constatação é de que o desenvolvimento nacional de modelos e controladores é incipiente.

4.1 Controle aplicado a células do tipo PEMFC

Este modelo foi descrito na dissertação de mestrado de VICENTE (2008). O problema da regulação da taxa de excesso de oxigênio é de grande relevância para o controle de células a combustível, principalmente em sistemas veiculares. Uma variação na demanda de potência do sistema de célula a combustível corresponde diretamente a uma variação na corrente do empilhamento e conseqüentemente varia a taxa de excesso de oxigênio. Para se evitar a falta de oxigênio no catodo é necessário ajustar o fluxo de ar que alimenta o empilhamento.O ar é regulador por um compressor, que por sua vez é regulador pela tensão do motor.

Considerando o sistema dinâmico, observável e contínuo é formulado o modelo como apresentado na Eq. 66, com **x** dado pela Eq. 67

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathrm{f}(\mathbf{x},\mathbf{u},\mathbf{w}) \tag{66}$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} m_{O_2,ca} & m_{H_2,an} & M_{N_2,ca} & \omega_{cp} & P_{sm} & m_{sm} & m_{vap,an} & P_{om} & m_{vap,ca} \end{pmatrix}^T \tag{67}$$

onde:

$m_{O_2,ca}$: Vazão mássica de oxigênio no catodo

$m_{H_2,an}$: Vazão mássica de hidrogênio no anodo

$M_{N_2,ca}$: Vazão mássica de nitrogênio no catodo

ω_{cp} : Velocidade do compressor

P_{sm} : Pressão de alimentação (*mainfold*)

m_{sm} : Massa total (*mainfold*)

$m_{vap,an}$: Vazão mássica de vapor de água no anodo

P_{om} : Pressão de saída (*mainfold*)

$m_{vap,ca}$: Vazão mássica de vapor de água no catodo

A ação de controle u é dada pela tensão no motor do compressor (V_{cm}) e a perturbação no sistema (w) é a corrente do empilhamento dada por I_{st} . A saída do sistema é a taxa de excesso de oxigênio (Λ_{O_2}). O sistema foi linearizado nas condições dadas pela Eq. 68-70 e as matrizes obtidas são apresentadas na Eq. 71-74. Nesse caso, $m_{vap,ca}$ não é considerado uma vez que o vapor de água é sempre saturado no catodo para toda a faixa de operação. Para fins deste estudo o sistema não terá os termos associados com perturbações medidas (w).

$$I_{st} = 191\text{A} \tag{68}$$

$$V_{cm} = 163{,}7\text{V} \tag{69}$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} 1{,}961 & 0{,}5692 & 12{,}92 & 78{,}02 & 2{,}148 & 38{,}544 & 1{,}061 & 1{,}753 \end{pmatrix}^{T} \tag{70}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -12{,}68 & 0 & -10{,}94 & 0 & 83{,}80 & 0 & 0 & 23{,}99 \\ 0 & -412{,}8 & 0 & 0 & 133{,}6 & 0 & -46{,}19 & 0 \\ -37{,}45 & 0 & -46{,}29 & 0 & 275{,}8 & 0 & 0 & 157{,}8 \\ 0 & 0 & 0 & -14{,}52 & 143{,}1 & 0 & 0 & 0 \\ 2{,}597 & 0 & 2{,}97 & 0{,}3834 & -37{,}67 & 0{,}0990 & 0 & 0 \\ 33{,}28 & 0 & 38{,}03 & 4{,}826 & -467{,}3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -198 & 0 & 0 & 62{,}57 & 0 & -78{,}33 & 0 \\ 4{,}047 & 0 & 4{,}623 & 0 & 0 & 0 & 0 & -50{,}47 \end{pmatrix} \tag{71}$$

$$\mathbf{B}^{T} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 3{,}509 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{T} \tag{72}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -1{,}273 & 0 & -1{,}454 & 0 & 13{,}89 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{73}$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix} \tag{74}$$

4.2 Sistema de processamento de combustível

Este modelo foi desenvolvido no doutoramento de Jay T Pukurshpan e encontra-se descrito na seguinte referência: PUKRUSHAN, STEFANOPOULOU E PENG (2005). A Figura 9 apresenta os principais componentes do sistema de processamento de combustível (FPS), sendo composto basicamente por 4 principais reatores: hidrodessulfurizador (HDS), reator catalítico de oxidação parcial (CPOX), reator de gás-água (WGS) e reator de oxidação preferencial (PROX), sendo o sistema alimentado com gás natural, realizando o processo de reforma catalítica, resultando em hidrogênio que, alimentará um sistema de células a combustível. O fluxo de ar atmosférico é alimentado pelo BLO e aquecido no HEX, sendo então misturado com o gás desulforizado no MIX.

Os estados são mostrados na Eq.75, as entradas e a perturbação na Eq. 76 e as saídas na Eq. 77. As Eqs 78-81 mostram as matrizes do sistema obtido.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} T_{CPOX} & P_{H_2,an} & P_{an} & P_{hex} & \omega_{blo} & P_{HDS} & P_{CH_4,mix} & P_{air,mix} & P_{H_2,wrox} & P_{wrox} \end{pmatrix}^T \quad (75)$$

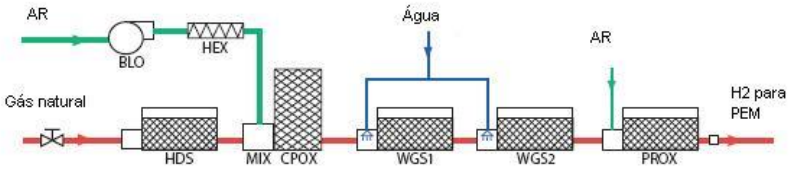

Figura 9 Principais componentes do FPS.

Onde :

T_{CPOX} : Temperatura no CPOX

$P_{H_2,an}$: Pressão de hidrogênio no anodo

P_{an} : Pressão no anodo

P_{hex} : Pressão no volume do trocador de calor

ω_{blo} : Velocidade do soprador

P_{HDS}: Pressão no hidrodessulfurizador

$P_{CH_4,mix}$: Pressão de metano no misturador

$P_{air,mix}$: Pressão de ar no mistrurador

$P_{H_2,wrox}$: Pressão de hidrogênio no WROX

P_{wrox} : Pressão no WROX

$\mathbf{w} = I_{st}$ sendo I_{st} a Corrente do empilhamento

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_{blo} & u_{valve} \end{pmatrix}^T \tag{76}$$

u_{blo} é o sinal para o soprador e u_{valve} é o sinal para a válvula de controle de combustível. O termo $y_{H_2,an}$ é a concentração de hidrogênio no anodo

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} T_{CPOX} & y_{H_2,an} \end{pmatrix}, \tag{77}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -0{,}074 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3{,}53 & 1{,}0748 & 0 & 1E-6 \\ 0 & -1{,}468 & -25{,}3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2{,}5582 & 13{,}911 \\ 0 & 0 & -156 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 33{,}586 \\ 0 & 0 & 0 & -124{,}5 & 212{,}63 & 0 & 112{,}69 & 112{,}69 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -3{,}333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -32{,}43 & 32{,}304 & 32{,}304 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 331{,}8 & -344 & -341 & 0 & 9{,}9042 \\ 0 & 0 & 0 & 221{,}97 & 0 & 0 & -253{,}2 & -254{,}9 & 0 & 32{,}526 \\ 0 & 0 & 2{,}03454 & 0 & 0 & 0 & 1{,}8309 & 1{,}214 & -0{,}358 & -3{,}304 \\ 0{,}0188 & 0 & 8{,}1642 & 0 & 0 & 0 & 5{,}6043 & 5{,}3994 & 0 & -13{,}61 \end{pmatrix} \tag{78}$$

$$\mathbf{B}^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}1834 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \tag{79}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}994 & -0{,}088 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{80}$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{81}$$

O modelo dinâmico obtido pode ser usado para se estudar os efeitos de variação do combustível e do ar na reação de oxidação parcial (CPOX), na concentração de hidrogênio para o empilhamento PEM e na eficiência do estado estacionário do sistema de CaC.O modelo dinâmico é ilustrado pela Figura 10.

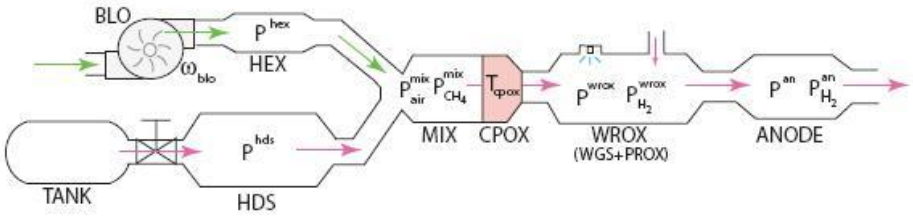

Figura 10 Modelo dinâmico do FPS

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As referências teóricas para o estudo realizado neste capítulo são: OGATA (1993), HENSON E SEBORG (1997), CAMACHO E BORDONS (1999).

5.1 Controle aplicado a células do Tipo PEMFC

Foi realizado um estudo de controle de processos aplicado ao modelo apresentado na seção 4.1.

A matriz de controlabilidade de estado do sistema possui posto 3. O sistema possui dimensão de estado em número de 8, ou seja, o sistema possui estados não controláveis. Entretanto, o interesse é de que o sistema seja de saídas controladas. Neste caso, o posto da matriz de controlabilidade de saída possui posto igual a 1, como existe apenas uma saída, o sistema é de saída controlável.

A matriz de observabilidade do sistema possui posto igual a 4. Como existem oito estados, o sistema possui estados não observáveis. Entretanto, considerando se tratar de um estudo de caso com foco na aplicação de controle preditivo será considerado que todos os estados são medidos.

Os pólos do sistema na forma contínua apresentam os valores negativos, sendo assim o sistema é estável em malha aberta. O sistema também não possui zeros positivos, e sendo assim trata-se de um sistema de fase mínima.

O sistema possui um número de condicionamento baixo (0,03), indicando que o modelo está próximo de regiões de solução singular em estado estacionário, podendo apresentar problemas de condicionamento.

A resposta em malha aberta do sistema submetido a uma pertubação impulso inicial de 1% em todos os estados é mostrada na Figura 11.

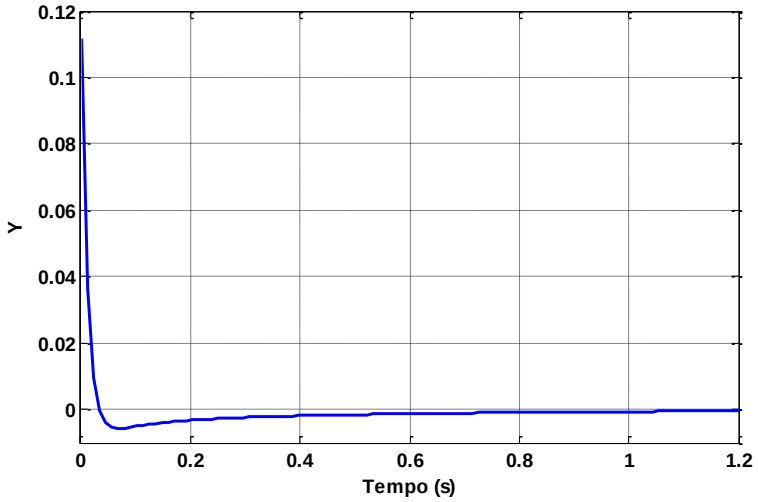

Figura 11 Malha aberta do sistema FC

O tempo de amostragem segue a lei de Nyquist e é de 0,1 s. O sistema possui como parâmetros de controle: horizonte de predição de 10 passos, horizonte de controle de 5 passos, pesos da entrada de 0,1 da matriz identidade de dimensão adequada, pesos das saídas como a matriz identidade de dimensão adequada. Foi realizada uma perturbação não medida constante de 10% na entrada e 10% na saída, resultando nas seguintes respostas típicas de caso regulador. O sistema se comporta como esperado para um controle efetivo. A Figura 12 mostra o comportamento do sistema em malha fechada com o controlador preditivo.

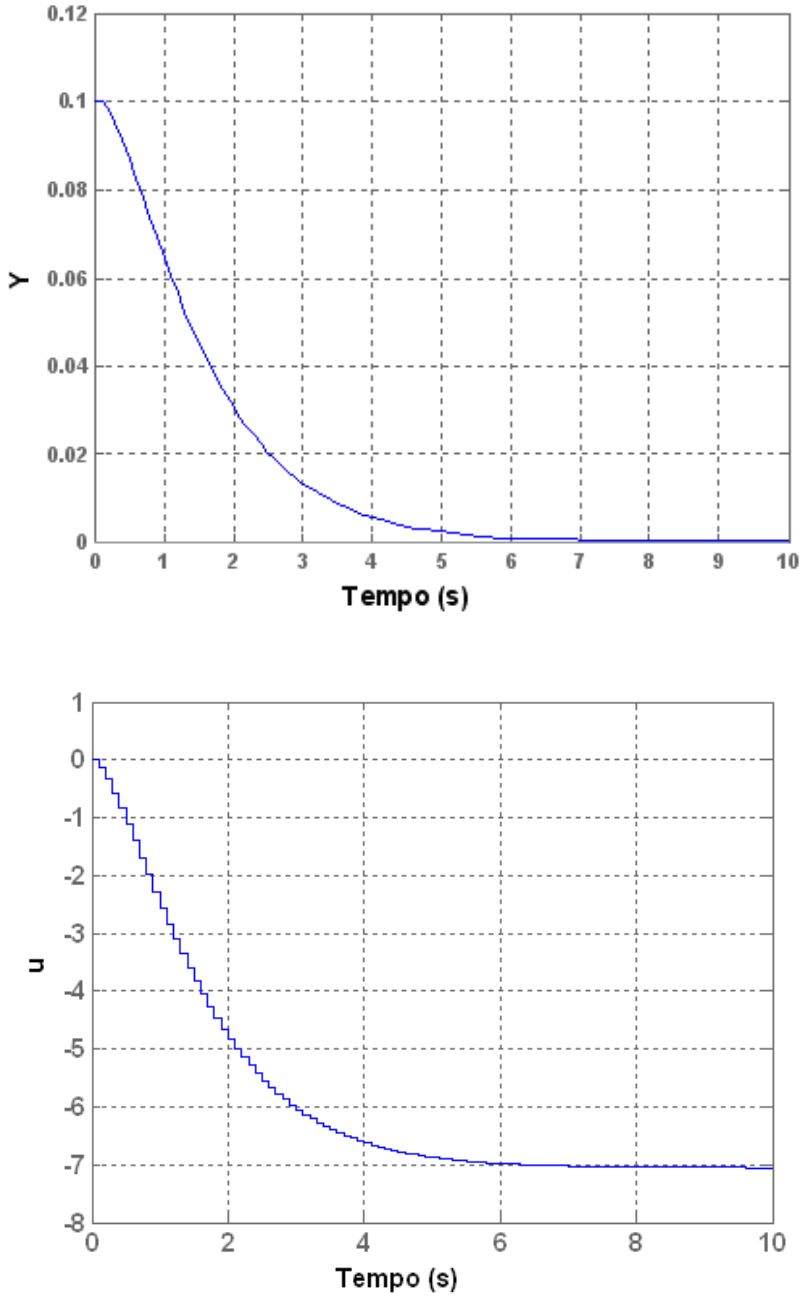

Figura 12 Resposta do sistema em malha fechada

5.2 Sistema de processamento de combustível

Foi realizado um estudo de controle de processos aplicado ao modelo apresentado na seção 4.2.

A matriz de controlabilidade de estado do sistema possui posto 7. O sistema possui dimensão de estado em número de 10, ou seja, o sistema possui estados não controláveis. Entretanto, o interesse é de que o sistema seja de saídas controladas. Neste caso, o posto da matriz de controlabilidade de saída possui posto igual a 2, como existem duas saída, o sistema é de saída controlável.

A matriz de observabilidade do sistema possui posto igual a 4. Como exsitem oito estados, o sistema possui estados não observáveis. Entretanto, considerando se tratar de um estudo de caso com foco na aplicação de controle preditivo será considerado que todos os estados são medidos.

Os pólos do sistema na forma contínua apresentam valores negativos, indicando que o sistema é estável em malha aberta. O sistema também não possui zeros positivos, e sendo assim trata-se de um sistema de fase mínima.

O sistema possui um número de condicionamento elevado, da ordem de 10^5, indicando que se trata de um processo bem condicionado, e afastado de regiões de solução singular em estado estacionário.

A resposta em malha aberta do sistema submetido a uma perturbação impulso inicial de 1% em todos os estados é mostrada na Figura 13.

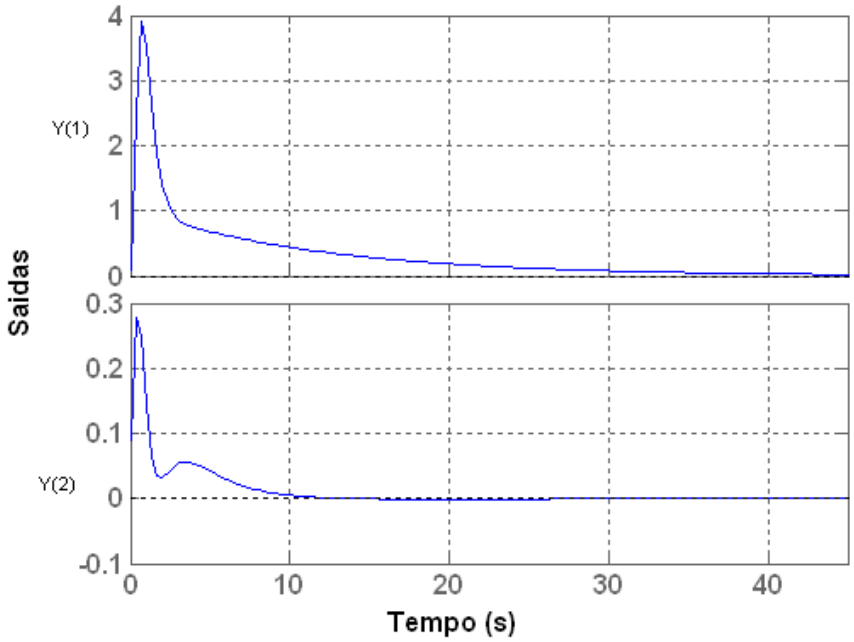

Figura 13 Resposta do sistema em malha aberta

O tempo de amostragem segue a lei de Nyquist e é de 1 s. O sistema possui como parâmetros de controle: horizonte de predição de 15 passos, horizonte de controle de 5 passos, pesos da entrada de 0,1 da matriz identidade de dimensão adequada, pesos das saídas como a matriz identidade de dimensão adequada. A simulação em malha aberta nesse caso foi para o *setpoint* nas saídas de [0,1 -0,1]. A Figura 14 mostra o comportamento do sistema em malha fechada com o controlador preditivo.

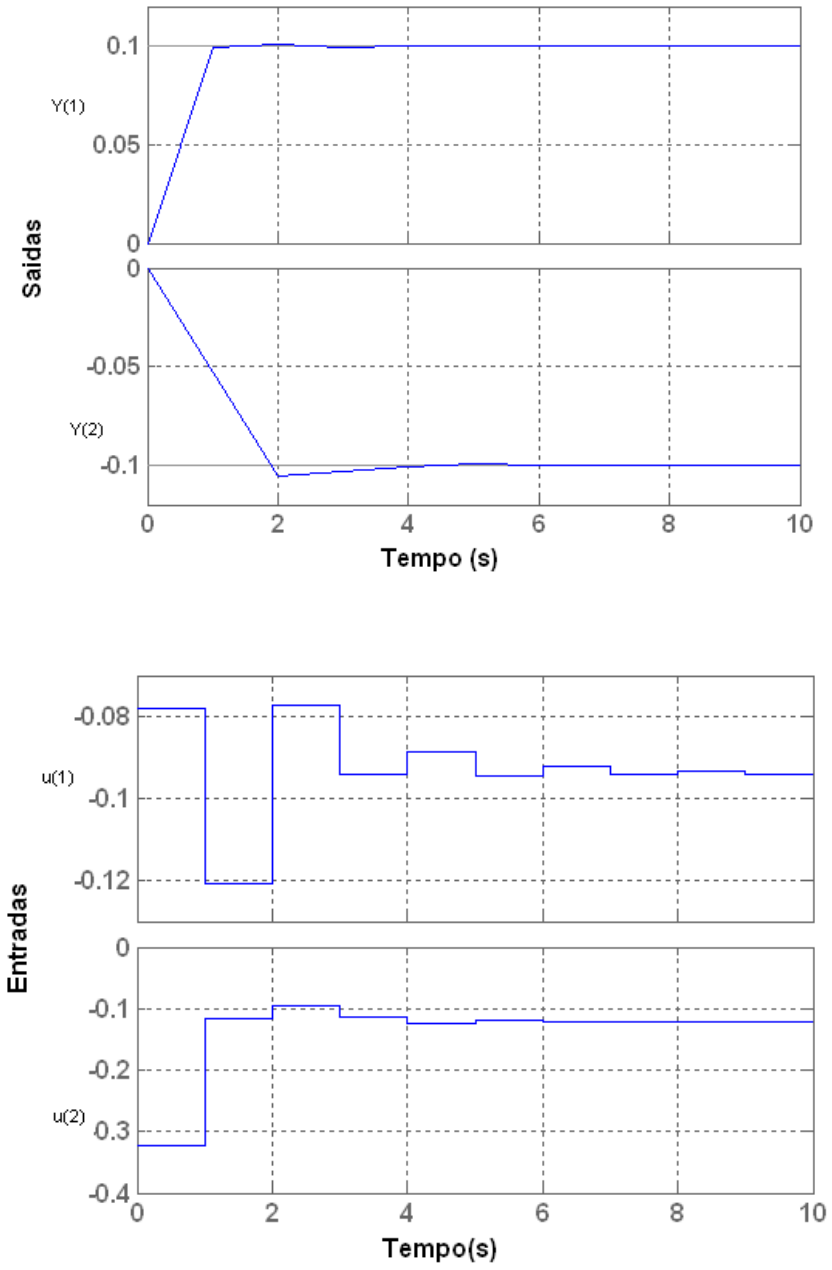

Figura 14 Resposta do sistema em malha fechada

5.3 Discussão

Ao longo deste estudo foi possível observar que existem poucos modelos disponíveis na literatura que tratem adequadamente do tema células a combustível no contexto do controle linear. No Brasil, considerando que o desenvolvimento da tecnologia em estágios iniciais não é encontrado na literatura relatos de desenvolvimento de modelos. A modelagem existente ou é complexa ou simples demais. Conclui-se que se trata de uma área carente de estudos e desenvolvimento, até mesmo de forma a acompanhar e subsidiar informações para evolução real dos equipamentos desta tecnologia.

Foram selecionados na literatura um modelo de célula PEMFC e um modelo de um reformador de etanol, de forma a se aplicar os conceitos de controle de processos, como foco específico no controle preditivo baseado em modelos (MPC).

O desenvolvimento da tecnologia das células a combustível se mantém como uma grande expectativa para o futuro da energia, sendo promissora no suprimento energético com baixos custos ambientais.

6 CONCLUSÃO

Os resultados se mostraram satisfatórios do ponto de vista da teoria de controle, regulando ou levando o sistema para o ponto de operação desejado em condições adequadas. As técnicas de controle se mostram úteis no controle de células, podendo contribuir com a sua eficiência e confiabilidade.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Construção ou adequação de um protótipo de célula a combustível tipo PEMFC, para modelagem dinâmica em tempo real;
- Utilizar redes neurais ou técnicas de modelagem empírica para gerar os modelos para aplicação de controle variante no tempo;
- Aplicação de técnicas avançadas de controle, incluindo controle *fuzzy* e controle preditivo robusto;
- Desenvolver uma modelagem dinâmica alternativa para propósitos de análise e controle de células a combustível.

REFERÊNCIAS

BLOMEN, LEO J. M. J. E MUGERWA, MICHAEL N.**Fuell Cell Systems**, Ed. Plenum Press, New York, 1993.

CAMACHO, E. F., BORDONS C. **Model Predictive Control**, Springer, Barcelona, Espanha,1999.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Estado da arte e tendências tecnológicas para energia**, Brasília, 2003.

CHRISTEN, U., MUSCH, H. E., STEINER, M. Robust Control of Distillation Columns: μ-vs H∞ - synthesis. **Journal of Process Control**, v. 7, nº 1, p. 19-30, 1997.

EG&G TECHNICAL SERVICES, INC., **Fuel Cell Handbook**, 7ª Ed., U.S. Department of Energy, Morgantown, WV, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia – PNE 2030**, Rio de Janeiro, 2006.

GARCIA, C. E., PRETT, D.M., MORARI, M. Model Predictive Control: Theory and Practice. A Survey. **Automatica**, v. 25, nº 3, p. 335-348, 1989.

GARCIA,C.E. & MORSHEDI, A. M. Quadratic Programming Solution of Dynamic Matrix Control (QDMC), **Chem. Eng. Commun.**,v. 46, p. 73-87, 1982.

GATTU,G. & ZAFIRIOU, E. Nonlinear Quadratic Dynamic Matrix control with State Estimator**, Ind. Eng. Chem. Res**. v. 31, nº 4, p. 1096-1104, 1992.

GRUNDY, P. **Shell energy scenarios to 2050**, Shell International BV, 2008.

HAVRE, K**. Studies on Controllability Analysis and Control Structure Design**, .Tese (Doutorado), Norwegian University of Science and Technology, 1998.

HENSON, M.A. & SEBORG, D. A. **Nonlinear Process Control**, Prentice-Hall, New Jersey, 1997.

HOLT, B. R., MORARI, M. Design of Resilient Processing Plants . V: The Effect of Dead time on Dynamic Resilience, **Chemical Engineering Science**, v. 40, Nº 7, p. 1229-1237, 1985a.

HOLT, B. R., MORARI, M. Design of Resilient Processing Plants . VI: The Effect of Right-Half-Plane Zero on Dynamic Resilience, **Chemical Engineering Science**, v. 40, nº 1, p. 59-74, 1985b.

J.T. PUKRUSHPAN, A.G. STEFANOPOULOU, H. PENG, **Control of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis, and Feedback Design**, Advances in Industrial Control Series, Springer-Verlag, London, 2004.

MORARI, M Design of Resilient Processing Plants . III: General Framework for the Assessment of Dynamic Resilience. **Chemical Engineering Science**, v. 38, nº 11, p. 1881-1891, 1983.

MORARI, M, ZARIFIOU, E., HOLT, B. R. Design of Resilient Processing Plants. New Characterization of Effect of the Zeros. **Chemical Engineering Science**, v. 42, nº 10, p. 2425-2428, 1987.

MORARI, M., ZAFIRIOU, E. **Robust Process Control**, Prentice-Hall, New Jersey, 1989.

MUSKE, K. R. & RAWLINGS J. B. Model Predictive Control with Linear Models, **AIChE J.**, v. 39, nº 2, p. 262-287, 1993.

OGATA, K. **Discrete-Time Control Systems**, Prentice-Hall, 2nd ed, 1987.
RICKER, N. L. Model Predictive Control with State Estimation, **Ind. Eng. Chem. Res.**,v. 29, p. 374-382, 1990.

RIFKI, J.**A Economia do Hidrogênio A criação de uma nova fonte de energia e a redistribuição do poder na terra**, Ed. M. Books, 2001.

SARGENT, R. W. H. Optimal Control, **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 124, p. 361-371, 2000.

SEBORG, D. E. A perspective on advanced strategies for process control, **Modeling, Identification and control**, v. 15, nº 3, p.179-189, 1994.

SILVA, C. H. F. **Modelagem e aplicação de técnicas de controle moderno e preditivo a sistemas de controle de velocidade e tensão de máquinas síncronas de pequenas centrais hidrelétricas**, 2002 dissertação (mestrado em desenvolvimento de processos químicos), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SILVA, C. H. F. **Uma contribuição ao estudo de controladores robustos**, 2009, Tese (doutorado em desenvolvimento de processos químicos), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOARES, B. E. C., NAVARRO, M. A., FERREIRA, A. P. Desenvolvimento sustentado e consciência ambiental: natureza, sociedade e racionalidade, **Ciência & Cognição**, v. 2, p. 44-49, 2004.

SYRMOS, V. L., ABDALLAH,C.T., DORATO P. AND GRIGORIADIS, K. Static Output Feedback – A Survey, **Automatica**, v. 33, nº 2, p. 125-137, 1997.

TOLMASQUIM, M. T. (Org.) **Fontes renovaveis de energia no Brasil**, 1º Ed., Ed. Interciência, 2003.

VICENTE, M. A. M. P. R. **Control applied to fuel cells oxygen excess ratio regulation** , Dissertação (mestrado),Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

WEINMANN, A. **Uncertain Models and Robust Control**. Springer-Verlag, New York,1991.

ANEXO A – DECLARAÇÃO DE AUTORIA

DECLARAÇÃO

Eu, Cláudio Homero Ferreira da Silva, estudante de pós-graduação *Lato Sensu* da UFLA, com número de matrícula FAE109002 no curso de FAE - Formas Alternativas de Energia, declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto à Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade Federal de Lavras, que, **sob as penalidades previstas no art. 299 do Código Penal Brasileiro,** que é de minha criação o trabalho de conclusão de curso - TCC que ora apresento, conforme exigência expressa no parágrafo único do art. 11 da Resolução n° 1, de 3 de abril de 2001, da Câmara de Educação Superior do Conselho Nacional de Educação.

Art. 299 do Código Penal Brasileiro, que dispõe sobre o crime de *Falsidade Ideológica:*

"Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia estar escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar verdade sobre fato juridicamente relevante:

Pena - reclusão, de 1 (um) a 5 (cinco) anos, e multa, se o documento é público, e reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos, e multa, se o documento é particular.

Parágrafo único. Se o agente é funcionário público, e comete o crime prevalecendo-se do cargo, ou se a falsificação ou alteração é de assentamento de registro civil, aumenta-se a pena de sexta parte".

Este crime engloba plágio e compra fraudulenta de documentos científicos.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração.

Belo Horizonte (MG),05 de Abril de 2010.

Cláudio Homero Ferreira da Silva

9º Ofício de Notas
CARTÓRIO DO 9º OFÍCIO DE NOTAS DE BELO HORIZONTE / MG
Rua São Paulo, 1115 - Centro - Fone:(31) 3247-3535
Tabeliã: Walquíria Mara Graciano Machado Rabelo
Reconheço por semelhança as firmas de
CLAUDIO HOMERO FERREIRA DA SILVA
Belo Horizonte, 12/04/2010
Emol:R$2,78 TFJ:R$0,92 Reconh:R$0,17 Total:R$3,87
Em testemunho da verdade.
Alberto Marques da Silva
JGAN
Selo de Fiscalização
RECONHECIMENTO DE FIRMA
AVE 45346
9º Ofício

ANEXO B – REVISÃO DE TEXTO

REVISÃO DO TEXTO

DECLARAÇÃO

Eu, Hélvora Martins da Costa Barbosa Santos, professora de Português no Colégio Naeme Campos, portador do registro de magistério n. 1728 do estado de Minas Gerais declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto à Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade Federal de Lavras, que fiz a revisão de texto do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Controle de Processos Aplicado a Sistemas de Produção de Hidrogênio e Células a Combustível** de autoria de **Cláudio Homero Ferreira da Silva.**

Por ser verdade, firmo a presente declaração:

Belo Horizonte, 27/04/2010.